

Auteursrechterlijke overeenkomst

Opdat de Universiteit Hasselt uw eindverhandeling wereldwijd kan reproduceren, vertalen en distribueren is uw akkoord voor deze overeenkomst noodzakelijk. Gelieve de tijd te nemen om deze overeenkomst door te nemen, de gevraagde informatie in te vullen (en de overeenkomst te ondertekenen en af te geven).

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling met

Titel: Hout als energiebron: vergelijking van vergassing en pyrolyse voor de omzetting van korte omloophout in warmte en elektriciteit via kosten-batenanalyse

Richting: 2de masterjaar handelsingenieur - technologie-, innovatie- en milieumanagement

Jaar: 2009

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Ik ga akkoord,

BLOEMEN, Annemarie
Datum: 14.12.2009

VOETS, Thomas

Hout als energiebron

vergelijking van vergassing en pyrolyse voor de omzetting van korte omloophout in warmte en elektriciteit via kosten-batenanalyse

Annemarie Bloemen, Thomas Voets

promotor :
Prof. dr. Theo THEWYS

Woord vooraf

Deze eindverhandeling is een afsluiting van onze vijfjarige opleiding Handelsingenieur aan de Universiteit Hasselt. Onze keuze voor dit onderwerp vloeit voort uit onze algemene interesse voor milieu-economie die onder meer gevoed werd tijdens de opleidingsonderdelen van de afstudeerrichting Technologie, Innovatie en Milieu.

Graag zouden we enkele personen willen bedanken die bijgedragen hebben aan de totstandkoming van deze eindverhandeling. Professor dr. Thewys willen we bedanken omdat hij ons de toelating heeft gegeven om dit onderwerp te behandelen. Verder appreciëren we het ook dat hij gedurende het hele jaar tijd noch moeite spaarde om ons bij te staan. Ook wensen we uitdrukkelijk onze begeleider, de heer Tom Kuppens, te bedanken voor het mee oplossen van onze problemen, het beantwoorden van onze vragen en het ons bezorgen van de nodige informatie. We waarderen het ten zeerste dat hij onmiddellijk tijd maakte voor ons wanneer dit nodig was.

Ook is een dankwoord op zijn plaats voor alle personen die op een of andere manier hebben bijgedragen tot het eindresultaat van deze verhandeling. We bedanken Ir. Marinus van Stijn die ons ontving in zijn pyrolyseplant in Tessenderlo en al diegenen die per e-mail onze vragen beantwoordden. Wij denken hierbij aan enkele auteurs die we contacteerden alsook een aantal medewerkers van VITO en Cogen Vlaanderen. Ook zijn we Sofie Ceunen dankbaar voor de raad, die zij ons uit haar eigen ervaringen heeft kunnen geven gedurende de afgelopen maanden. Een laatste dankwoord gaat uit naar onze ouders, die ons de kans gegeven hebben om aan de Universiteit Hasselt te studeren en die ons steeds gesteund hebben tijdens onze studies.

Annemarie Bloemen

Thomas Voets

Samenvatting

In deze eindverhandeling wordt de economische haalbaarheid van de vergassing en pyrolyse van korte omloophout nagegaan. De eindverhandeling gaat van start met een technische bespreking van beide conversietechnieken. Het is immers noodzakelijk om een inzicht te hebben in de werking van beide technieken, alvorens men kan overgaan tot een economische analyse ervan. Eerst wordt er kennis gemaakt met begrippen zoals biomassa en korte omloophout. Vervolgens worden het vergassings- en pyrolyseproces besproken en komen er verschillende typen reactoren aan bod. Tenslotte wordt er dieper ingegaan op het begrip warmtekrachtkoppeling.

Tijdens de economische analyse beperkt het onderzoek zich tot een capaciteit van 5 tot 50 MW_e elektrische energie. Om de rendabiliteit van beide technieken te bepalen wordt er gebruik gemaakt van de netto contante waarde-methode. De netto contante waarde (NCW) van de door ons bestudeerde investeringsprojecten bestaat uit een eenmalige initiële investering en de jaarlijkse operationele kosten en opbrengsten. Bij de bepaling van de initiële investeringskosten worden er twee subsidies, de ecologiepremie en de verhoogde investeringsaftrek, in rekening gebracht. De initiële investeringskosten van een warmtekrachtkoppeling zijn hoger dan die van een installatie waarin er enkel elektriciteit wordt geproduceerd. Er dient immers een extra investering te worden gedaan om de geproduceerde warmte af te kunnen zetten. Bij eenzelfde elektrisch vermogen zijn de initiële investeringskosten van een vergassinginstallatie steeds hoger dan die van een pyrolyse-installatie. Voor vergassing worden de operationele kosten ingedeeld in onderhoudskosten, personeelskosten, aanvoerkosten korte omloophout, verzekeringskosten en algemene overheadkosten, transport- en behandelingskosten van de assen en energiekosten. Bij pyrolyse vinden we dezelfde indeling terug maar hierbij worden de transport- en behandelingskosten van de assen vervangen door de verwerkingskosten van de cokes. De operationele kosten zijn steeds het hoogst bij pyrolyse. Dit is vooral te wijten aan de hoge aanvoerkosten van het korte omloophout ten gevolge van de lage elektrische efficiëntie van het pyrolyseproces en de hoge energiekosten door de grote hoeveelheid koelwater dat wordt verbruikt. Bij de gescheiden productie van elektriciteit bestaan de operationele opbrengsten uit de opbrengsten van de verkoop van elektriciteit en de verkoop van groenestroomcertificaten. Het aantal groenestroomcertificaten dat men ontvangt is

afhankelijk van de geproduceerde hoeveelheid elektriciteit. Indien er naast elektriciteit ook warmte wordt geproduceerd en afgezet nemen de operationele opbrengsten toe met de opbrengsten van de verkoop van warmte en de verkoop van warmtekrachtcertificaten. Alvorens men deze warmtekrachtcertificaten ontvangt, dient men echter aan een aantal voorwaarden te voldoen. De operationele opbrengsten zijn voor alle vermogens van 5 tot 50 MW_e het hoogst bij pyrolyse, al is het verschil steeds beperkt. Indien er enkel elektriciteit wordt geproduceerd zijn de ontvangsten uit de verkoop van elektriciteit het hoogst bij pyrolyse omdat dat bij deze techniek het proces wordt voorzien van elektriciteit door de verbranding van cokes en het niet-condenseerbaar gas, terwijl bij vergassing hiervoor een deel van de geproduceerde elektriciteit wordt aangewend waardoor de afgezette hoeveelheid elektriciteit kleiner wordt. Dit is ook het geval indien er naast elektriciteit ook warmte wordt geproduceerd. Bovendien zijn de opbrengsten uit de verkoop van warmtekrachtcertificaten hoger bij pyrolyse dan bij vergassing omwille van een hogere primaire energiebesparing.

In hoofdstuk 7 wordt er voor zowel vergassing als voor pyrolyse onderzocht of de omzetting van korte omloophout in elektriciteit rendabel is. De netto contante waarde is steeds positief, behalve bij de investering in een vergassingsinstallatie met een elektrisch vermogen van 5 MW. Bij een elektrisch vermogen van 5 MW_e en 10 MW_e leidt de investering in een pyrolyse-installatie tot een hogere NCW dan de investering in een vergassingsinstallatie. Bij hogere capaciteiten is de NCW het hoogst bij vergassing. Een soortgelijke analyse wordt doorgevoerd in hoofdstuk 8, maar hier gaat het om een warmtekrachtkoppeling en wordt er naast elektriciteit dus ook warmte geproduceerd. De netto contante waarde is steeds positief. Bij een elektrisch vermogen dat niet groter is dan 30 MW_e leidt pyrolyse tot de hoogste NCW. Bij een capaciteit van 40 MW_e of meer is de investering in een WKK-vergassingsinstallatie het meest rendabel.

In hetzelfde hoofdstuk vergelijken we de berekeningen op basis van ons economisch model met enkele praktijkvoorbeelden. Hieruit blijkt dat de door ons geschatte investeringskost vaak sterk afwijkt van de werkelijke investeringskost wegens omstandigheden die specifiek zijn voor een bepaalde installatie en die niet in een theoretisch model kunnen opgenomen worden.

In hoofdstuk 9 wordt nagegaan of het rendabel is voor de eigenaar van een pyrolyse-installatie om enkel de geproduceerde pyrolyse-olie te verkopen. Uit deze analyse blijkt dat de netto contante waarde steeds negatief is. De opbrengsten uit de verkoop van de

geproduceerde pyrolyse-olie zijn immers veel te klein om de hogere operationele kosten te compenseren.

Met behulp van een scenarioanalyse wordt er in hoofdstuk 10 onderzocht hoeveel procent van de geproduceerde warmte er afgezet dient te worden alvorens de investering in een WKK-installatie rendabel wordt. Het is immers weinig waarschijnlijk dat men er in slaagt om alle geproduceerde warmte af te zetten. Voor vergassing blijkt dat de investering in een WKK-installatie waarin er 75% of minder van de geproduceerde warmte wordt afgezet minder rendabel is dan de investering in een installatie waarin er enkel elektriciteit wordt opgewekt. Bij pyrolyse is de netto contante waarde van een WKK-installatie waarin 75% van de geproduceerde warmte wordt afgezet hoger dan bij de gescheiden productie van elektriciteit. Indien er slechts 25% of 50% van de geproduceerde warmte wordt afgezet is dit echter niet het geval. Verder wordt er in dit hoofdstuk onderzocht of de investering in een pyrolyse-installatie rendabel is wanneer de aangevoerde biomassa vervuild is met zware metalen. Indien de biomassa vervuild is, kunnen de cokes die tijdens het pyrolyseproces ontstaan niet meer aangewend worden om het proces van elektriciteit te voorzien. De cokes dienen immers verwerkt te worden tegen een hoge kost. Dit resulteert voor alle onderzochte scenario's in een lagere NCW dan bij niet vervuilde biomassa.

Uit de economische analyse blijkt dat de aanvoerkosten van het korte omloophout een groot deel van de totale operationele kosten uitmaken. Daarom wordt in hoofdstuk 11 berekend hoeveel deze aanvoerkost maximaal mag bedragen, opdat de netto contante waarde niet negatief is. Vaak leidt minder dan een verdubbeling van de aanvoerkost tot een negatieve netto contante waarde.

Tijdens de sensitiviteitsanalyse (hoofdstuk 12) wordt de gezamenlijke invloed van een aantal variabelen op de rendabiliteit van de investering bestudeerd. Het gaat hier om de aanvoerkost van het korte omloophout, de totale investeringskosten en de verkoopprijs van de geproduceerde warmte en elektriciteit. Verder wordt er ook nagegaan wat de invloed op de rendabiliteit van de investering is, indien de toekenning van groenestroom- en warmtekrachtcertificaten wordt beperkt of wordt stopgezet. Bij vergassing blijkt een procentuele wijziging van de totale investeringskosten een grotere invloed te hebben op de netto contante waarde dan een even grote procentuele wijziging van de aanvoerkost van het korte omloophout. Bij pyrolyse geldt het omgekeerde. Een procentuele wijziging

van de verkoopprijs van elektriciteit heeft voor zowel vergassing als voor pyrolyse een grotere invloed op de netto contante waarde dan een even grote procentuele wijziging van de verkoopprijs van warmte. Tenslotte stellen we vast dat zowel de groenestroomcertificaten als de warmtekrachtcertificaten van groot belang zijn voor de rendabiliteit van de investering in vergassing of pyrolyse.

In het daarop volgende hoofdstuk wordt er dieper ingegaan op de belangrijkste positieve en negatieve externe effecten van de vergassing en pyrolyse van korte omloophout. Tenslotte volgt er in hoofdstuk 14 bij wijze van besluit een vergelijkende analyse tussen beide technieken en worden er nog enkele suggesties voor verder onderzoek gegeven.

Inhoudsopgave

Woord vooraf	I
Samenvatting	II
Inhoudsopgave	VI
Lijst der afkortingen	XV
Lijst van tabellen	XVI
Lijst van figuren	XXIII
Hoofdstuk 1: Probleemstelling	1
1.1 Praktijkprobleem: omschrijving en situering	1
1.2 Centrale onderzoeksvraag	3
1.3 Deelvragen	3
VERGASSING EN PYROLYSE: STATE OF THE ART	4
Hoofdstuk 2: Korte omloophout.....	5
2.1 Definitie biomassa	5
2.2 Korte omloophout: eigenschappen	6
2.3 Voorbehandeling van korte omloophout	9
2.3.1 <i>Drogen</i>	9
2.3.2 <i>Verkleinen</i>	10
2.3.3 <i>Verdichten</i>	10
2.3.4 <i>Torrefactie</i>	11
Hoofdstuk 3: Vergassing	12
3.1 Wat is vergassing?	12
3.2 Type vergassingsreactoren	13
3.2.1 <i>Vastbedvergassers</i>	14
3.2.2 <i>Wervelbedvergassers</i>	15
3.2.3 <i>Entrained-flowvergassers</i>	15
3.3 Stookgas	16
3.3.1 <i>Definitie stookgas</i>	16

3.3.2 <i>Energie recuperatie stookgas</i>	17
3.3.2.1 De gasmotor	17
3.3.2.2 De gasturbine	18
3.3.2.3 STEG-centrale	19
3.4 Vergunningen	19
3.5 Emissies	20
Hoofdstuk 4: Pyrolyse	21
4.1 Wat is pyrolyse?	21
4.2 Het pyrolyseproces	22
4.3 Type pyrolysereactoren	23
4.3.1 <i>Stationair wervelbed</i>	23
4.3.2 <i>Circulerend wervelbed</i>	24
4.3.3 <i>Trommelpyrolyse</i>	25
4.3.4 <i>Ablatieve pyrolyse</i>	25
4.3.5 <i>Vacuümpyrolyse</i>	26
4.3.6 <i>Actieve cycloon</i>	26
4.4 Flash-pyrolyse	27
4.5 Pyrolyse-olie	28
4.6 Emissies	29
4.7 Warmtekrachtkoppeling	29
4.8 Fiscale voordelen en subsidies WKK	31
VERGASSING EN PYROLYSE: STATE OF THE MONEY	34
Hoofdstuk 5: Kosten-batenanalyse	35
5.1 De netto contante waarde-methode	35
5.2 De totale investeringskosten	35
5.3 De vrije operationele kasstromen (VOKS) en de actuele waarde	36
5.4 Netto contante waarde (NCW)	36
5.5 Basisprincipes NCW-methode	37
5.6 NCW-methode toegepast op onze gevalstudie	39
Hoofdstuk 6: Korte omloophout en energieopbrengst	41
6.1 Assumpties	41

6.2 Energieopbrengst	41
6.2.1 <i>Energiegebruik tijdens teelt en oogst</i>	41
6.2.2 <i>Energiegebruik tijdens transport</i>	43
6.2.2.1 Elektrische efficiëntie vergassing	44
6.2.2.2 Elektrische efficiëntie pyrolyse	45
6.2.2.3 Berekeningen energiegebruik bij transport	48
6.2.3 <i>Netto energieopbrengst</i>	52
Hoofdstuk 7: Vergassing en pyrolyse met elektriciteitsopwekking.....	53
7.1 De initiële investering	53
7.1.1 <i>Totale investeringskosten van vergassing</i>	53
7.1.2 <i>Totale investeringskosten van pyrolyse</i>	59
7.1.3 <i>Ecologiepremie</i>	64
7.1.3.1 Essentiële investeringscomponenten vergassing	65
7.1.3.2 Essentiële investeringscomponenten pyrolyse	66
7.1.3.3 Performantiefactor	69
7.1.4 <i>Investeringsaftrek</i>	70
7.1.5 <i>De initiële investering van vergassing</i>	73
7.1.6 <i>De initiële investering van pyrolyse</i>	73
7.2 Operationele kosten vergassing	74
7.2.1 <i>Onderhoudskosten</i>	74
7.2.2 <i>Personeelskosten</i>	75
7.2.3 <i>Aanvoerkosten korte omloophout</i>	77
7.2.4 <i>Verzekeringskosten en algemene overheadkosten</i>	81
7.2.5 <i>Transport- en behandelingskosten van de assen</i>	81
7.2.6 <i>Energiekosten</i>	82
7.3 Operationele kosten pyrolyse	86
7.3.1 <i>Onderhoudskosten</i>	87
7.3.2 <i>Personeelskosten</i>	87
7.3.3 <i>Aanvoerkosten korte omloophout</i>	89
7.3.4 <i>Verzekeringskosten</i>	91
7.3.5 <i>Algemene overheadkosten</i>	91
7.3.6 <i>Verwerkingskosten cokes</i>	91
7.3.7 <i>Energiekosten</i>	92
7.4 Operationele opbrengsten	96

7.4.1 Opbrengsten uit verkoop elektriciteit afkomstig van vergassing	96
7.4.2 Opbrengsten uit verkoop elektriciteit afkomstig van pyrolyse	96
7.4.3 Groenestroomcertificaten	97
7.5 NCW van vergassing en pyrolyse	98

Hoofdstuk 8: Vergassing en pyrolyse met warmtekrachtkoppeling102

8.1 Inleiding	102
8.2 District heating	106
8.3 De initiële investering WKK	107
8.3.1 Indeling totale investeringskosten WKK	107
8.3.2 Totale investeringskosten WKK vergassing	109
8.3.3 Totale investeringskosten WKK pyrolyse	113
8.3.4 Ecologiepremie	117
8.3.4.1 Ecologiepremie vergassing	118
8.3.4.2 Ecologiepremie pyrolyse	118
8.3.5 Investeringsaftrek	120
8.3.6 De initiële investering van vergassing	123
8.3.7 De initiële investering van pyrolyse	124
8.4 Operationele kosten WKK	124
8.4.1 Operationele kosten vergassing	125
8.4.1.1 Onderhoudskosten	125
8.4.1.2 Personeelskosten	125
8.4.1.3 Aanvoerkosten korte omloophout	126
8.4.1.4 Verzekeringskosten en algemene overheadkosten	127
8.4.1.5 Transport- en behandelingskosten van de assen	127
8.4.1.6 Energiekosten	128
8.4.2 Operationele kosten pyrolyse	130
8.4.2.1 Onderhoudskosten	130
8.4.2.2 Personeelskosten	130
8.4.2.3 Aanvoerkosten korte omloophout	131
8.4.2.4 Verzekeringskosten	132
8.4.2.5 Algemene overheadkosten	132
8.4.2.6 Verwerkingskosten cokes	132
8.4.2.7 Energiekosten	133
8.5 Operationele opbrengsten	135

8.5.1 Opbrengsten uit verkoop elektriciteit vergassing	135
8.5.2 Opbrengsten uit verkoop elektriciteit pyrolyse	136
8.5.3 Opbrengsten uit verkoop warmte vergassing	136
8.5.4 Opbrengsten uit verkoop warmte pyrolyse	137
8.5.5 Certificatenregeling	138
8.5.5.1 Groenestroomcertificaten vergassing en pyrolyse	139
8.5.5.2 Warmtekrachtcertificaten	139
8.5.5.2.1 Warmtekrachtcertificaten vergassing	141
8.5.5.2.2 Warmtekrachtcertificaten pyrolyse	143
8.5.5.3 Combinatie certificaten	144
8.5.5.4 Samenstelling operationele opbrengsten vergassing	144
8.5.5.5 Samenstelling operationele opbrengsten pyrolyse	145
8.6 NCW WKK vergassing en pyrolyse	146
8.7 Vergelijking met de werkelijkheid	149
Hoofdstuk 9: Pyrolyse voor verkoop pyrolyse-olie	153
9.1 De initiële investering	153
9.1.1 Totale investeringskosten	153
9.1.2 Ecologiepremie	154
9.1.3 Investeringsaftrek	154
9.1.4 De initiële investering van pyrolyse	155
9.2 Operationele kosten pyrolyse	155
9.2.1 Onderhoudskosten	155
9.2.2 Personeelskosten	155
9.2.3 Aanvoerkosten korte omloophout	156
9.2.4 Verzekeringskosten	156
9.2.5 Algemene overheadkosten	157
9.2.6 Verwerkingskosten cokes	157
9.2.7 Energiekosten	157
9.3 Operationele opbrengsten	159
9.4 NCW van pyrolyse	160
Hoofdstuk 10: Scenarioanalyse	162
10.1 Warmteafzet	162
10.1.1 Scenario 1: gescheiden productie elektriciteit	162

10.1.2 Scenario 2: warmteafzet 25%	163
10.1.3 Scenario 3: warmteafzet 50%	165
10.1.4 Scenario 4: warmteafzet 75%	166
10.1.5 Scenario 5: warmteafzet 100%	167
10.1.6 Algemeen besluit	167
10.2 Vervuilde wilg	168
10.2.1 Vervuilde wilg bij vergassing	169
10.2.2 Vervuilde wilg bij pyrolyse	169
10.2.2.1 Scenario 1: vervuilde wilg bij pyrolyse bij gescheiden productie elektriciteit	169
10.2.2.2 Scenario 2: vervuilde wilg bij pyrolyse bij warmteafzet 25%	170
10.2.2.3 Scenario 3: vervuilde wilg bij pyrolyse bij warmteafzet 50%	171
10.2.2.4 Scenario 4: vervuilde wilg bij pyrolyse bij warmteafzet 75%	171
10.2.2.5 Scenario 5: vervuilde wilg bij pyrolyse bij warmteafzet 100%	172
10.2.2.6 Algemeen besluit	172

Hoofdstuk 11: Aanvoerkost korte omloophout en NCW173

Hoofdstuk 12: Sensitiviteitsanalyse176

12.1 Identificatie variabelen	176
12.2 Sensitiviteitsanalyse vergassing	177
12.2.1 Sensitiviteitsanalyse vergassing bij gescheiden productie elektriciteit	177
12.2.1.1 Totale investeringskosten en aanvoerkost korte omloophout	177
12.2.1.2 Aanvoerkost korte omloophout en verkoopprijs elektriciteit	178
12.2.1.3 Totale investeringskosten en verkoopprijs elektriciteit	179
12.2.2 Sensitiviteitsanalyse vergassing bij 50% warmteafzet	179
12.2.2.1 Totale investeringskosten en aanvoerkost korte omloophout	179
12.2.2.2 Verkoopprijs warmte en verkoopprijs elektriciteit	180
12.2.2.3 Aanvoerkost korte omloophout en verkoopprijs elektriciteit	180
12.2.2.4 Aanvoerkost korte omloophout en verkoopprijs warmte	180
12.2.2.5 Totale investeringskosten en verkoopprijs elektriciteit	180
12.2.2.6 Totale investeringskosten en verkoopprijs warmte	181
12.2.3 Sensitiviteitsanalyse vergassing bij 75% warmteafzet	181
12.2.3.1 Totale investeringskosten en aanvoerkost korte omloophout	181
12.2.3.2 Verkoopprijs warmte en verkoopprijs elektriciteit	181

12.2.3.3 Aanvoerkost korte omloophout en verkoopprijs elektriciteit	182
12.2.3.4 Aanvoerkost korte omloophout en verkoopprijs warmte	182
12.2.3.5 Totale investeringskosten en verkoopprijs elektriciteit	182
12.2.3.6 Totale investeringskosten en verkoopprijs warmte	183
<i>12.2.4 Sensitiviteitsanalyse vergassing bij 100% warmteafzet</i>	183
12.2.4.1 Totale investeringskosten en aanvoerkost korte omloophout	183
12.2.4.2 Verkoopprijs warmte en verkoopprijs elektriciteit	184
12.2.4.3 Aanvoerkost korte omloophout en verkoopprijs elektriciteit	184
12.2.4.4 Aanvoerkost korte omloophout en verkoopprijs warmte	184
12.2.4.5 Totale investeringskosten en verkoopprijs elektriciteit	184
12.2.4.6 Totale investeringskosten en verkoopprijs warmte	185
12.2.4.7 Certificaten en totale investeringskosten	185
<i>12.2.4.7.1 Groenestroomcert. en totale investeringsk.</i>	185
<i>12.2.4.7.2 Warmtekrachtcert. en totale investeringsk.</i>	185
<i>12.2.4.7.3 Groenestroomcert., warmtekrachtcert. en totale investeringsk.</i>	186
12.2.4.8 Certificaten en aanvoerkost korte omloophout	186
<i>12.2.4.8.1 Groenestroomcert. en aanvoerkost korte omloophout</i>	186
<i>12.2.4.8.2 Warmtekrachtcert. en aanvoerkost korte omloophout</i>	186
<i>12.2.4.8.3 Groenestroomcert., warmtekrachtcert. en aanvoerkost korte omloophout</i>	186
12.3 Sensitiviteitsanalyse pyrolyse	187
<i>12.3.1 Sensitiviteitsanalyse pyrolyse bij gescheiden productie elektriciteit</i>	187
12.3.1.1 Totale investeringskosten en aanvoerkost korte omloophout	187
12.3.1.2 Aanvoerkost korte omloophout en verkoopprijs elektriciteit	187
12.3.1.3 Totale investeringskosten en verkoopprijs elektriciteit	187
<i>12.3.2 Sensitiviteitsanalyse pyrolyse bij 50% warmteafzet</i>	188
12.3.2.1 Totale investeringskosten en aanvoerkost korte omloophout	188
12.3.2.2 Verkoopprijs warmte en verkoopprijs elektriciteit	188
12.3.2.3 Aanvoerkost korte omloophout en verkoopprijs elektriciteit	189
12.3.2.4 Aanvoerkost korte omloophout en verkoopprijs warmte	189
12.3.2.5 Totale investeringskosten en verkoopprijs elektriciteit	189
12.3.2.6 Totale investeringskosten en verkoopprijs warmte	190
<i>12.3.3 Sensitiviteitsanalyse pyrolyse bij 75% warmteafzet</i>	190
12.3.3.1 Totale investeringskosten en aanvoerkost korte omloophout	190

12.3.3.2 Verkoopprijs warmte en verkoopprijs elektriciteit	191
12.3.3.3 Aanvoerkost korte omloophout en verkoopprijs elektriciteit	191
12.3.3.4 Aanvoerkost korte omloophout en verkoopprijs warmte	191
12.3.3.5 Totale investeringskosten en verkoopprijs elektriciteit	192
12.3.3.6 Totale investeringskosten en verkoopprijs warmte	192
<i>12.3.4 Sensitiviteitsanalyse pyrolyse bij 100% warmteafzet</i>	192
12.3.4.1 Totale investeringskosten en aanvoerkost korte omloophout	192
12.3.4.2 Verkoopprijs warmte en verkoopprijs elektriciteit	193
12.3.4.3 Aanvoerkost korte omloophout en verkoopprijs elektriciteit	193
12.3.4.4 Aanvoerkost korte omloophout en verkoopprijs warmte	193
12.3.4.5 Totale investeringskosten en verkoopprijs elektriciteit	193
12.3.4.6 Totale investeringskosten en verkoopprijs warmte	194
12.3.4.7 Certificaten en totale investeringskosten	194
<i>12.3.4.7.1 Groenestroomcertif. en totale investeringsk.</i>	194
<i>12.3.4.7.2 Warmtekrachtcertif. en totale investeringsk.</i>	194
<i>12.3.4.7.3 Groenestroomcert., warmtekrachtcert. en totale investeringskosten</i>	194
12.3.4.8 Certificaten en aanvoerkost korte omloophout	195
<i>12.3.4.8.1 Groenestroomcert. en aanvoerkost korte omloophout</i>	195
<i>12.3.4.8.2 Warmtekrachtcert. en aanvoerkost korte omloophout</i>	195
<i>12.3.4.8.3 Groenestroomcert., warmtekrachtcert. en aanvoerkost korte omloophout</i>	195
12.4 Conclusie sensitiviteitsanalyse	195

Hoofdstuk 13: Externe effecten198

Hoofdstuk 14: Algemene conclusies en aanbevelingen204

14.1 Vergelijkende analyse	204
<i>14.1.1 De initiële investering</i>	204
<i>14.1.2 De operationele kosten</i>	207
<i>14.1.3 De operationele opbrengsten</i>	208
<i>14.1.4 De netto contante waarde</i>	209
14.2 Conclusies en aanbevelingen voor verder onderzoek	210

Literatuurlijst	216
Bijlagen.....	231



Lijst der afkortingen

AMINAL: Administratie Milieu-, Natuur-, Land- en Waterbeheer

EG: energiegebruik

FAVV: Federaal Agentschap voor de Veiligheid van de Voedselketen

INBO: Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek

kWh: kilowattuur

$M_{G/CC}$: flow ratio van de biomassa die aan de vergasser gevoed wordt, uitgedrukt in kg per uur

M_{HRSG} : flow ratio van de stoom die geproduceerd wordt door de warmterecupererende stoomgenerator, uitgedrukt in kg per uur

MJ: megajoule

Nm³: normaal kubieke meter

NREL: National Renewable Energy Laboratory

odt: oven dry ton

SELI: Stanford Educational Leadership Institute

STEG: stoom- en gasturbine

tds: ton droge stof

TNO: Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek

VLAREM II: Besluit van de Vlaamse regering houdende algemene en sectorale bepalingen inzake milieuhygiëne

VREG: Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt

W_{GT} : netto elektriciteitsoutput van de gasturbine, uitgedrukt in MW_e

W_{NE} : netto elektriciteitsoutput van het vergassingsproces, uitgedrukt in MW_e

W_{ST} : netto elektriciteitsoutput van de stoomcyclus, uitgedrukt in MW_e

Lijst van tabellen

Tabel 1: gemiddelde opbrengst korte omloophout per hectare per jaar voor wilg en populier bij extensieve biomassabouw	7
Tabel 2: plantdichtheid per hectare en rotatielengte	8
Tabel 3: gewenste vochtpercentage waarmee het korte omloophout in de pyrolyse- installatie of vergassingsinstallatie wordt ingebracht	9
Tabel 4: samenstellingen en calorische waarden van stookgas uit vergassing van hout met lucht bij atmosferische druk	16
Tabel 5: voorbeelden van stof- en teergehalte van stookgas uit vergassing van hout bij verschillende type vergassingsreactoren	17
Tabel 6: gewone pyrolyse versus flash-pyrolyse	27
Tabel 7: actualisatiefactor	36
Tabel 8: elektrische efficiëntie van vergassingsinstallatie	44
Tabel 9: elektrische efficiëntie van vergassingsinstallatie bij verschillende vermogens	44
Tabel 10: omrekening elektrische output naar ton droge stof bij vergassing	45
Tabel 11: omrekening elektrische output naar ton droge stof bij pyrolyse	47
Tabel 12: oppervlakte energiegewas bij vergassing	48
Tabel 13: oppervlakte energiegewas bij pyrolyse	49
Tabel 14: berekening oppervlakte aanvoergebied bij vergassing	50
Tabel 15: berekening oppervlakte aanvoergebied bij pyrolyse	50
Tabel 16: vervoersafstand per lading wilg bij vergassing	51
Tabel 17: vervoersafstand per lading wilg bij pyrolyse	51
Tabel 18: energieconsumptie wilg tijdens transport bij vergassing	51
Tabel 19: energieconsumptie wilg tijdens transport bij pyrolyse	51
Tabel 20: netto energieopbrengst wilg bij vergassing	52
Tabel 21: netto energieopbrengst wilg bij pyrolyse	52
Tabel 22: fractie van totale elektriciteit opgewekt door respectievelijk de stoomturbine en gasturbine	54
Tabel 23: berekening flow ratio van de biomassa die aan de vergasser wordt gevoed	54
Tabel 24: totale investeringskosten atmosferische vergasser	56
Tabel 25: totale investeringskosten STEG-centrale	56
Tabel 26: totale investeringskosten vergassing	57

Tabel 27: investeringskosten per MW _e bij vergassing	58
Tabel 28: gewicht investeringscomponenten	59
Tabel 29: indeling totale uitrustingskosten	59
Tabel 30: totale investeringskosten eigenlijke pyrolyseproces	60
Tabel 31: totale opslagkosten pyrolyse-olie	61
Tabel 32: totale investeringskosten dieselmotor	61
Tabel 33: totale investeringskosten dieselmotor per MW _e	62
Tabel 34: totale investeringskosten pyrolyse	62
Tabel 35: investeringskosten per MW _e bij pyrolyse	63
Tabel 36: berekening ecologiepremie voor vergassingsinstallatie 5 MW _e	65
Tabel 37: ecologiepremie vergassing	66
Tabel 38: essentiële investeringscomponenten verbranding en vergassing bij ecologiepremie	67
Tabel 39: essentiële investeringscomponenten pyrolyse bij ecologiepremie	68
Tabel 40: ecologiepremie pyrolyse	68
Tabel 41: verhoogde investeringsaftrek vergassing	71
Tabel 42: essentiële investeringscomponenten verbranding en vergassing bij verhoogde investeringsaftrek	72
Tabel 43: essentiële investeringscomponenten pyrolyse bij verhoogde investeringsaftrek	72
Tabel 44: verhoogde investeringsaftrek pyrolyse	73
Tabel 45: initiële investering vergassing	73
Tabel 46: initiële investering pyrolyse	74
Tabel 47: onderhoudskosten vergassing	74
Tabel 48: aantal werknemers vergassingsinstallatie	75
Tabel 49: aantal werknemers STEG-centrale	76
Tabel 50: totale personeelskosten vergassing	76
Tabel 51: aankoopkost en transportkost korte omloophout	78
Tabel 52: transportkost per ton droge stof wilg bij vergassing	80
Tabel 53: aanvoerkost per ton droge stof wilg bij vergassing	80
Tabel 54: totale aanvoerkosten korte omloophout bij vergassing	80
Tabel 55: verzekeringskosten en algemene overheadkosten vergassing	81
Tabel 56: transport- en behandelingskosten assen vergassing	82
Tabel 57: benodigde hoeveelheid elektriciteit vergassingsinstallatie	82
Tabel 58: benodigde hoeveelheid elektriciteit STEG-centrale	83

Tabel 59: totale besparing elektriciteit vergassing	84
Tabel 60: totale kosten water STEG-centrale	84
Tabel 61: totale jaarlijkse operationele kosten vergassing	85
Tabel 62: aandeel initiële investering in totale kosten bij gescheiden productie elektriciteit vergassing	86
Tabel 63: onderhoudskosten pyrolyse	87
Tabel 64: overzicht gemiddeld jaarloon per arbeider	87
Tabel 65: aantal werknemers bij pyrolyse-installatie	88
Tabel 66: aantal werknemers bij dieselmotor	89
Tabel 67: totale personeelskosten bij pyrolyse	89
Tabel 68: transportkost per ton droge stof wilg bij pyrolyse	89
Tabel 69: aanvoerkost per ton droge stof wilg bij pyrolyse	90
Tabel 70: totale aanvoerkosten korte omloophout bij pyrolyse	90
Tabel 71: verzekeringskosten pyrolyse	91
Tabel 72: algemene overheadkosten bij pyrolyse	91
Tabel 73: benodigde hoeveelheid elektriciteit pyrolyse-installatie	92
Tabel 74: benodigde hoeveelheid elektriciteit dieselmotor	93
Tabel 75: totale besparing elektriciteit pyrolyse	93
Tabel 76: totale kosten water bij pyrolyse-installatie	93
Tabel 77: totale jaarlijkse operationele kosten pyrolyse	94
Tabel 78: aandeel initiële investering in totale kosten bij gescheiden productie elektriciteit pyrolyse	95
Tabel 79: totale opbrengsten uit verkoop van geproduceerde elektriciteit bij vergassing	96
Tabel 80: totale opbrengsten uit verkoop van geproduceerde elektriciteit bij pyrolyse	97
Tabel 81: jaarlijkse opbrengsten uit verkoop groenestroomcertificaten	97
Tabel 82: berekening totale jaarlijkse netto kasopbrengsten vergassing	98
Tabel 83: berekening totale jaarlijkse netto kasopbrengsten pyrolyse	99
Tabel 84: netto contante waarde vergassing en pyrolyse	99
Tabel 85 : keuze tussen vergassing en pyrolyse bij gescheiden productie elektriciteit	101
Tabel 86: elektrisch en thermisch rendement WKK	103
Tabel 87: omzettingstabel WKK vergassing	104
Tabel 88: omzettingstabel WKK pyrolyse	105

Tabel 89: thermische output uitgedrukt in megajoule per jaar bij vergassing	109
Tabel 90: gemiddelde hoeveelheid verdeelde warmte en distributie bij vergassing	110
Tabel 91: berekening totale kosten van warmteverdeling bij vergassing	110
Tabel 92: kosten warmteverdeling per MW _e bij vergassing	111
Tabel 93: totale investeringskosten exclusief warmteverdeling bij vergassing	112
Tabel 94: totale investeringskosten WKK vergassing	112
Tabel 95: totale investeringskosten exclusief warmteverdeling bij pyrolyse	114
Tabel 96: thermische output uitgedrukt in megajoule per jaar bij pyrolyse	114
Tabel 97: gemiddelde hoeveelheid verdeelde warmte en distributie bij pyrolyse	114
Tabel 98: berekening totale kosten van warmteverdeling bij pyrolyse	115
Tabel 99: kosten warmteverdeling per MW _e bij pyrolyse	115
Tabel 100: totale investeringskosten WKK pyrolyse	116
Tabel 101: berekening ecologiepremie bij WKK vergassing	118
Tabel 102: ecologiepremie bij WKK vergassing	118
Tabel 103: essentiële investeringscomponenten WKK verbranding en vergassing bij ecologiepremie	119
Tabel 104: essentiële investeringscomponenten WKK pyrolyse bij ecologiepremie	119
Tabel 105: ecologiepremie WKK pyrolyse	119
Tabel 106: verhoogde investeringsaftrek bij WKK vergassing	122
Tabel 107: essentiële investeringscomponenten WKK verbranding en vergassing bij verhoogde investeringsaftrek	122
Tabel 108: essentiële investeringscomponenten WKK pyrolyse bij verhoogde investeringsaftrek	123
Tabel 109: verhoogde investeringsaftrek WKK pyrolyse	123
Tabel 110: initiële investering WKK vergassing	123
Tabel 111: initiële investering WKK pyrolyse	124
Tabel 112: onderhoudskosten WKK vergassing	125
Tabel 113: personeelskosten WKK vergassing	126
Tabel 114: aanvoerkost per ton droge stof wilg bij WKK vergassing	126
Tabel 115: totale aanvoerkosten korte omloophout bij WKK vergassing	126
Tabel 116: verzekeringskosten en algemene overheadkosten bij WKK vergassing	127
Tabel 117: transport- en behandelingskosten van de assen bij WKK vergassing	127
Tabel 118: totale kosten water STEG-centrale bij WKK	128
Tabel 119: totale jaarlijkse operationele kosten WKK bij vergassing	128
Tabel 120: aandeel initiële investering in totale kosten bij WKK vergassing	129

Tabel 121: onderhoudskosten WKK pyrolyse	130
Tabel 122: personeelskosten WKK pyrolyse	131
Tabel 123: aanvoerkost per ton droge stof wilg bij WKK pyrolyse	131
Tabel 124: totale aanvoerkosten korte omloophout bij WKK pyrolyse	131
Tabel 125: verzekeringskosten WKK pyrolyse	132
Tabel 126: algemene overheadkosten WKK pyrolyse	132
Tabel 127: totale kosten water bij WKK-installatie pyrolyse	133
Tabel 128: totale jaarlijkse operationele kosten bij WKK pyrolyse	133
Tabel 129: aandeel initiële investering in totale kosten bij WKK pyrolyse	134
Tabel 130: totale opbrengsten uit verkoop van geproduceerde elektriciteit bij WKK vergassing	135
Tabel 131: totale opbrengsten uit verkoop van geproduceerde elektriciteit bij WKK pyrolyse	136
Tabel 132: totale opbrengsten uit verkoop van warmte bij WKK vergassing	137
Tabel 133: totale opbrengsten uit verkoop van warmte bij WKK pyrolyse	137
Tabel 134: opbrengsten uit verkoop groenestroomcertificaten	139
Tabel 135: aantal warmtekrachtcertificaten voor jaar 1-4 bij WKK vergassing	142
Tabel 136: opbrengsten uit verkoop warmtekrachtcertificaten bij WKK vergassing	142
Tabel 137: aantal warmtekrachtcertificaten voor jaar 1-4 bij WKK pyrolyse	143
Tabel 138: opbrengsten uit verkoop warmtekrachtcertificaten bij WKK pyrolyse	143
Tabel 139: netto contante waarde vergassing en pyrolyse bij WKK	147
Tabel 140 : keuze tussen vergassing en pyrolyse bij gescheiden productie elektriciteit en WKK	149
Tabel 141: procentuele afwijking in totale investeringskosten	152
Tabel 142: totale investeringskosten pyrolyse-installatie bij enkel verkoop pyrolyse-olie	153
Tabel 143: ecologiepremie pyrolyse bij enkel verkoop pyrolyse-olie	154
Tabel 144: verhoogde investeringsaftrek pyrolyse bij enkel verkoop pyrolyse-olie	154
Tabel 145: initiële investering pyrolyse bij enkel verkoop pyrolyse-olie	155
Tabel 146: onderhoudskosten pyrolyse bij enkel verkoop pyrolyse-olie	155
Tabel 147: totale personeelskosten pyrolyse bij enkel verkoop pyrolyse-olie	156
Tabel 148: totale aanvoerkosten korte omloophout bij enkel verkoop pyrolyse-olie	156
Tabel 149: verzekeringskosten pyrolyse bij enkel verkoop pyrolyse-olie	156
Tabel 150: algemene overheadkosten bij pyrolyse bij enkel verkoop pyrolyse-olie	157

Tabel 151: totale jaarlijkse operationele kosten pyrolyse bij enkel verkoop pyrolyse-olie	158
Tabel 152: geproduceerde hoeveelheid pyrolyse-olie	159
Tabel 153: opbrengsten uit verkoop pyrolyse-olie	159
Tabel 154: berekening totale netto kasopbrengsten pyrolyse bij enkel verkoop pyrolyse-olie	160
Tabel 155: netto contante waarde bij enkel verkoop pyrolyse-olie	161
Tabel 156: netto contante waarde vergassing en pyrolyse bij warmteafzet 0%	162
Tabel 157: netto contante waarde vergassing en pyrolyse bij warmteafzet 25%	164
Tabel 158: netto contante waarde vergassing en pyrolyse bij warmteafzet 50%	165
Tabel 159: netto contante waarde vergassing en pyrolyse bij warmteafzet 75%	166
Tabel 160: netto contante waarde vergassing en pyrolyse bij warmteafzet 100%	167
Tabel 161: keuze tussen vergassing en pyrolyse bij verschillende percentages warmteafzet	168
Tabel 162: totale verwerkingskosten cokes	169
Tabel 163: totale opbrengsten uit verkoop van geproduceerde elektriciteit	170
Tabel 164: netto contante waarde pyrolyse met vervuilde biomassa bij warmteafzet 0%	170
Tabel 165: netto contante waarde pyrolyse met vervuilde biomassa bij warmteafzet 25%	171
Tabel 166: netto contante waarde pyrolyse met vervuilde biomassa bij warmteafzet 50%	171
Tabel 167: netto contante waarde pyrolyse met vervuilde biomassa bij warmteafzet 75%	172
Tabel 168: netto contante waarde pyrolyse met vervuilde biomassa bij warmteafzet 100%	172
Tabel 169: aanvoerkost korte omloophout opdat NCW nul is bij gescheiden productie elektriciteit	173
Tabel 170: aanvoerkost korte omloophout opdat NCW nul is bij WKK	174
Tabel 171: aanvoerkost korte omloophout opdat NCW nul is bij enkel verkoop pyrolyse-olie	175
Tabel 172: externe baat van biomassa-installatie ten opzichte van steenkoolcentrale bij zowel vergassing als pyrolyse	200
Tabel 173: berekening CO ₂ -uitstoot van transport korte omloophout naar vergassingsinstallatie	202

Tabel 174: berekening CO ₂ -uitstoot van transport korte omloophout naar pyrolyse-installatie	202
Tabel 175: toename totale investeringskosten vergassing bij WKK in vergelijking met elektriciteitsproductie	205
Tabel 176: toename totale investeringskosten pyrolyse bij WKK in vergelijking met elektriciteitsproductie	206
Tabel 177 : keuze tussen vergassing en pyrolyse bij enkel elektriciteitsopwekking en warmteafzet 50 en 100%	209
Tabel 178: keuze die tot hoogste NCW leidt	209

Lijst van figuren

Figuur 1: schematische voorstelling van het vergassingsproces	13
Figuur 2: verschillende types van vergassers: (a) vergasser met vast bed en opwaartse luchtstroom; (b) vergasser met vast bed en neerwaartse luchtstroom; (c) gewone wervelbedvergasser en (d) circulerende wervelbedvergasser	14
Figuur 3: warmtekrachtkoppeling met gasturbine in open cyclus	18
Figuur 4: luchttoevoer bij pyrolyse, vergassing en verbranding	21
Figuur 5: processchema van een stationair wervelbed voor pyrolyse	24
Figuur 6: processchema van een circulerend wervelbed voor pyrolyse	25
Figuur 7: schematische voorstelling pyrolyse-installatie met enkel opwekking elektriciteit	46
Figuur 8: totale investeringskosten in functie van elektriciteitsoutput bij vergassing	57
Figuur 9: investeringskost per MW _e in functie van elektriciteitsoutput Bij vergassing	58
Figuur 10: totale investeringskosten in functie van elektriciteitsoutput voor pyrolyse	63
Figuur 11: investeringskost per MW _e in functie van elektriciteitsoutput bij pyrolyse	64
Figuur 12: taartdiagram operationele kosten vergassing	86
Figuur 13: taartdiagram operationele kosten pyrolyse	95
Figuur 14: netto contante waarde in functie van elektriciteitsoutput (vergasning en pyrolyse bij enkel elektriciteitsopwekking)	100
Figuur 15 : vereenvoudigde voorstelling van de energetische balans tussen een warmtekrachtkoppeling (links) en een gescheiden productie (rechts)	102
Figuur 16: schematische voorstelling pyrolyse-installatie (WKK)	105
Figuur 17: omzetting van MJ km/ jaar naar kW km	110
Figuur 18: kosten warmteverdeling per MW _e bij vergassing	111
Figuur 19: investeringskost WKK per MW _e in functie van elektriciteitsoutput bij vergassing	113
Figuur 20 : kosten warmteverdeling per MW _e bij pyrolyse	116
Figuur 21: investeringskost WKK per MW _e in functie van elektriciteitsoutput bij pyrolyse	117
Figuur 22: taartdiagram operationele kosten WKK bij vergassing	129
Figuur 23: taartdiagram operationele kosten WKK bij pyrolyse	134

Figuur 24: basisprincipes certificatensysteem	138
Figuur 25: samenstelling operationele opbrengsten vergassing bij een capaciteit van 5 MW _e voor jaren 1 – 4	144
Figuur 26: samenstelling operationele opbrengsten vergassing bij een capaciteit van 5 MW _e voor jaren 12 – 20	145
Figuur 27: samenstelling operationele opbrengsten pyrolyse bij een capaciteit van 5 MW _e voor jaren 1 – 4	145
Figuur 28: samenstelling operationele opbrengsten pyrolyse bij een capaciteit van 5 MW _e voor jaren 17 – 20	146
Figuur 29: netto contante waarde in functie van elektriciteitsoutput (vergassing en pyrolyse WKK)	148
Figuur 30: taartdiagram operationele kosten bij pyrolyse voor de olie	158
Figuur 31: voorbeeld van een jaarbelastingsduurkromme	212

Hoofdstuk 1: Probleemstelling

1.1 Praktijkprobleem: omschrijving en situering

In de Belgische Kempen heeft het productieproces van de zinkfabrieken van Balen, Overpelt en Lommel geleid tot een historische bodemverontreiniging met zware metalen zoals arseen en cadmium. (Wynants) De restproducten van dit productieproces werden vroeger gebruikt als materiaal voor onder andere de aanleg van wegen en het ophogen van percelen. De zware metalen zijn nog steeds aanwezig in het leefmilieu en oefenen een invloed uit op de mens en de natuur. (Vlaams Agentschap Zorg en Gezondheid, 2008) De omvang van het verontreinigde gebied is 700 km². (Ovam Benekempen, 2009)

Uit een onderzoek van Staessen, dat in 2008 werd afgerond, bij 1 217 volwassenen uit Mol, Balen, Overpelt, Neerpelt en Lommel blijkt dat mensen die al meer dan 25 jaar in de nabije omgeving van de vervuulende bedrijven wonen meer met het zware metaal cadmium in contact komen. Het onderzoek stelt dat de lokale bevolking vooral via zelfgeteelde groenten en drinkwater met cadmium en arseen in contact komt. Hierdoor loopt ze een hoger gezondheidsrisico dan mensen uit het controlegebied Hechtel. (Vlaams Agentschap Zorg en Gezondheid, 2008)

Een andere manier waarop men blootgesteld wordt aan de metaalvervuiling is via het inademen van stofdeeltjes die cadmium omvatten. Neervallend en opwaaiend stof bevatten een fijne fractie stofdeeltjes die tot diep in de longen kunnen doordringen. (Wynants)

Universiteit Hasselt en het FAVV (2002) onderzochten de risico's die verbonden zijn aan de opname van zware metalen in landbouwgewassen die als veevoeder gebruikt worden. Het vee werd op de aanwezigheid van cadmium onderzocht. Het merendeel van de geanalyseerde nierstalen van het vee, afkomstig van het verontreinigde gebied, overschreed de cadmiumnorm. (Milieurapport Vlaanderen MIRA, 2007)

Braakliggende verontreinigde terreinen en verontreinigde landbouwpercelen zijn belangrijke bronnen voor de blootstelling van de mens aan zware metalen. Het telen van landbouwgewassen voor dierlijke of menselijke consumptie op deze verontreinigde terreinen of percelen is niet wenselijk. Er zal immers cadmium in de voedselketen

terecht komen. (Actieplan cadmium, 2006) Wegens een overschreden cadmiumnorm legde het Federaal Voedselagentschap in 2004 zelfs een exportverbod voor levende dieren op aan de gemeenten Overpelt, Lommel, Neerpelt en Balen. Het inkomensverlies voor de landbouwers omwille van deze beperking bleef echter beperkt. (De Standaard, 2004) Toch dienen er maatregelen genomen te worden om het risico dat deze landbouwers zonder inkomen vallen te beperken. Hiertoe dringt zich een bodemsanering op.

Er bestaan verschillende technieken om de met zware metalen vervuilde bodem te zuiveren. Een veelgebruikte saneringstechniek is het afgraven van verontreinigde grond. Hierbij wordt de nutriëntrijke teeltgrond verwijderd, waardoor een groot deel van de metaalvoorraad verwijderd wordt. (Klok *et al.*, 2004) In een artikel van De Coster (2005) wordt vermeld dat volgens Vangronsveld deze klassieke saneringstechniek niet kan worden toegepast op grote gebieden zoals in de Noorderkempen. Een andere saneringstechniek is fyto-remediatie. Bij fyto-remediatie maakt men gebruik van planten om milieuverontreinigingen in de grond of in het water te verwijderen of te immobiliseren. (Boosten, 2005) Fyto-remediatie kent een belangrijk kostenvoordeel. Mueller en Goswami (2001) vermelden immers dat deze techniek tot 90% goedkoper kan zijn dan *ex-situ* saneringstechnieken zoals afgraving. Verder is het belangrijk te vermelden dat de aanplanting van energiegewassen zoals koolzaad, energiemaïs en korte omloophout voor fyto-remediatie een dubbele doelstelling heeft. Naast het reduceren van de cadmiumvervuiling is het immers mogelijk om er na de oogst energie mee op te wekken. (Actieplan cadmium, 2006) Hierdoor is de boer verzekerd van een alternatief inkomen. Hij ontvangt immers geld voor de verkoop van zijn energiegewassen aan producenten van groene energie. De voornaamste beperking van fyto-remediatie is het tijdsaspect. Het kan immers tientallen jaren duren alvorens de bodem volledig gesaneerd is. (Raskin en Ensley, 2000) Korte omloophout vertoont een vrij grote metaaltolerantie en is in staat om hoge concentraties aan zware metalen in zijn weefsels te accumuleren. (Garcia *et al.*, 2003) Dit is de reden waarom er in deze studie voor dit energiegewas wordt gekozen.

Bridgwater *et al.* (2002) vermelden verbranding, vergassing en pyrolyse als technieken voor de omzetting van korte omloophout in energie. Bij verbranding dienen de geproduceerde warmte en elektriciteit ter plaatse afgezet te worden. Bij vergassing en pyrolyse gebeurt er een conversie in energiedragers. Het stookgas dat ontstaat bij

vergassing en de pyrolyse-olie en het gas die ontstaan bij pyrolyse kunnen ter plaatse worden aangewend voor energieopwekking of elders ingezet worden. De pyrolyse-olie kan efficiënter verplaatst worden dan de biomassa omwille van de grotere energie-inhoud. (Ten Bolscher, 2007)

1.2 Centrale onderzoeksvraag

Onder welke voorwaarden zijn de omzetting van korte omloophout via vergassing of pyrolyse rendabele conversietechnieken?

1.3 Deelvragen

We splitsen de centrale onderzoeksvraag op in de volgende deelvragen:

- a) Wanneer is vergassing van korte omloophout economisch rendabel wanneer er enkel elektriciteit wordt geproduceerd, rekening houdend met de bijhorende kosten en subsidies?
- b) Wanneer is pyrolyse van korte omloophout economisch rendabel wanneer er enkel elektriciteit wordt geproduceerd, rekening houdend met de bijhorende kosten en subsidies?
- c) Wanneer is vergassing van korte omloophout economisch rendabel wanneer er naast elektriciteit ook warmte wordt geproduceerd, rekening houdend met de bijhorende kosten en subsidies?
- d) Wanneer is pyrolyse van korte omloophout economisch rendabel wanneer er naast elektriciteit ook warmte wordt geproduceerd, rekening houdend met de bijhorende kosten en subsidies?
- e) Wanneer is de productie van pyrolyse-olie uit de pyrolyse van korte omloophout rendabel, rekening houdend met de bijhorende kosten en subsidies?
- f) Hoe groot mag de aanvoerkost van het korte omloophout zijn opdat de investering voor zowel vergassing als pyrolyse rendabel is?
- g) Welke positieve en negatieve externe effecten treden er op bij de conversie van korte omloophout in elektriciteit en warmte?
- h) Welke van de twee technieken (vergassing/ pyrolyse) is in welke omstandigheden te verkiezen boven de andere?

VERGASSING EN PYROLYSE: STATE OF THE ART

Hoofdstuk 2: Korte omloophout

2.1 Definitie biomassa

Onder biomassa verstaat men 'alle organische materialen en hernieuwbare grondstoffen van plantaardige of dierlijke oorsprong die bestemd zijn voor industriële toepassingen (niet-voeding gebruik) of voor energieopwekking (warmte, elektriciteit, motorbrandstof)'. (ODE Vlaanderen, 2007) De Europese richtlijn 2001 betreffende de bevordering van elektriciteitsopwekking uit hernieuwbare energiebronnen op de interne elektriciteitsmarkt geeft de volgende definitie van biomassa: 'de biologisch afbreekbare fractie van producten, afvalstoffen en residuen van de landbouw (met inbegrip van plantaardige en dierlijke stoffen), de bosbouw en aanverwante bedrijfstakken, alsmede de biologisch afbreekbare fractie van industrieel en huishoudelijk afval.'

In de richtlijn 2001/ 80/ EG van het Europees Parlement en de Raad van 23 oktober 2001 inzake de beperking van de emissies van bepaalde verontreinigende stoffen in de lucht door grote stookinstallaties werd een ruimere definitie voor biomassa vastgelegd:

'Producten die geheel of gedeeltelijk bestaan uit plantaardig landbouw- en bosbouw materiaal dat gebruikt kan worden als brandstof om de energetische inhoud ervan te benutten, alsmede de volgende als brandstof gebruikte afvalstoffen:

- a. plantaardig afval uit land- en bosbouw;
- b. plantaardig afval van de levensmiddelenindustrie, indien de opgewekte warmte wordt teruggewonnen;
- c. vezelachtig afval afkomstig van de productie van ruwe pulp en van de productie van papier uit pulp; indien het op de plaats van productie wordt meeeverbrand en de opgewekte warmte wordt teruggewonnen;
- d. kurkafval;
- e. houtafval, met uitzondering van houtafval dat ten gevolge van een behandeling met houtbeschermingsmiddelen of door het aanbrengen van een beschermingslaag gehalogeneerde organische verbindingen dan wel zware metalen kan bevatten, wat in het bijzonder het geval is voor afval afkomstig van bouw- en sloopafval.'

Op 5 maart 2004 heeft de Vlaamse regering in een nieuw besluit de definitie van hernieuwbare energiebronnen aangepast aan bovenstaande Europese definitie, door de vervanging van het besluit van 28 september 2001 inzake de bevordering van elektriciteitsopwekking uit hernieuwbare energiebronnen. Door een aantal veranderingen in de Europese richtlijn was een aanpassing van de nationale regelgeving noodzakelijk. In de aangepaste definitie wordt biomassa omschreven als: ' producten, bestaande uit plantaardige materialen of delen daarvan van landbouw of bosbouw, die kunnen worden gebruikt om de energie-inhoud terug te winnen, alsmede de volgende afvalstoffen:

- plantaardig afval van land- en bosbouw;
- plantaardig afval van de levensmiddelenindustrie;
- vezelachtig afval afkomstig van de productie van ruwe pulp en van de productie van papier uit pulp, dat op de plaats van productie wordt meeverbrand en waarvan de vrijgekomen energie wordt teruggewonnen;
- onbehandeld houtafval: natuurlijk hout, schors inbegrepen, dat alleen een mechanische behandeling heeft ondergaan;
- kurkafval;
- niet verontreinigd behandeld houtafval' (Neyens *et al.*, 2004)

2.2 Korte omloophout: eigenschappen

Energieteelten worden voornamelijk geteeld voor de productie van bio-energie. Men dient een onderscheid te maken tussen de teelt van niet-houtige gewassen en de teelt van snelgroeiende houtige gewassen zoals korte omloophout. Deze laatste behoren niet alleen tot de noemer van energieteelten maar kunnen ook geklasseerd worden binnen het domein van de bosbouw. (Ceulemans *et al.*, 2001)

Voor biobrandstoffen is er een indeling gemaakt naar oliehoudende gewassen en bio-ethanolgewassen. De oliehoudende gewassen kunnen aangewend worden als grondstof voor biodiesel of plantaardige olie. De bio-ethanolgewassen hebben een groot potentieel als zetmeel- en suikerhoudende gewassen en kunnen verwerkt worden tot bio-ethanol. (Van der Voort *et al.*, 2008) Energieteelten zijn CO₂-neutraal. Dit wil zeggen dat alle koolstof die bij de energieopwekking vrijkomt, initieel door de planten uit de atmosfeer werd opgenomen. Energieteelten dragen dus niet bij tot de toename van de atmosferische CO₂-uitstoot. (Ceulemans *et al.*, 2001)

Korte omloophout zijn dichte aanplantingen die bestaan uit snelgroeiende boomsoorten zoals populier en wilg. Eenmaal aangeplant kan het korte omloophout ongeveer om de drie tot vijf jaar geoogst worden. (Geurds *et al.*, 2006) Bij het aanplanten van korte omloophout dient men te streven naar een zo hoog mogelijke opbrengst en een zo laag mogelijke milieubelasting. Een hoge opbrengst realiseren is mogelijk door het toepassen van een aantal traditionele landbouwtechnieken zoals irrigatie en bemesting op deze energieteelten. Dit noemt men intensieve biomassabouw. Hierbij zijn opbrengsten van 20 tot 25 ton droge stof per hectare per jaar mogelijk. Wanneer men streeft naar een zo laag mogelijke milieubelasting doet men aan extensieve biomassabouw, waarbij er geen sprake is van eerder vernoemde landbouwtechnieken. Bij extensieve biomassabouw produceert men gemiddeld 8 tot 12 ton droge stof per hectare per jaar. (Ceulemans *et al.*, 2001) Onderstaande tabel geeft een overzicht van een aantal waarnemingen van de gemiddelde opbrengst aan korte omloophout per hectare per jaar voor wilg en populier bij extensieve biomassabouw.

Bron	Wilg	Populier
Agri Holland		11 - 15 ton droge stof per hectare per jaar (in België en Nederland)
Garcia <i>et al.</i> (2003)	10,8 ton droge stof per hectare per jaar (in Vlaanderen)	10,8 ton droge stof per hectare per jaar (in Vlaanderen)
Geurds <i>et al.</i> (2006)	10 - 12 ton droge stof per hectare per jaar (in Vlaanderen)	10 - 12 ton droge stof per hectare per jaar (in Vlaanderen)
Dawson (2007)	10 - 12 ton droge stof per hectare per jaar (in Noord-Ierland)	

Tabel 1: gemiddelde opbrengst korte omloophout per hectare per jaar voor wilg en populier bij extensieve biomassabouw

Volgens het Department of Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA) stijgt de opbrengst aan korte omloophout normaal gesproken naarmate men vaker oogst. Dit wordt bevestigd door Dawson (2007). Volgens hem kan dit verklaard worden doordat de aangeplante wilg of populier nog niet volledig volgroeid is bij de eerste oogst.

Met behulp van een plantmachine worden er zo'n 10 000 tot 20 000 stekken geplant per hectare. In de eerste jaren wordt het onkruid verwijderd. Wanneer de korte-omloopcyclus erop zit, meestal na drie tot vijf jaar, wordt de geproduceerde biomassa geoogst tijdens de winter. Vervolgens worden de geoogste stammen verhakseld,

opgeslagen en gedroogd. Tenslotte gaat men over tot de thermische omzetting van de houtachtige biomassa. (Meersman en Pauwels)

Tabel 2 geeft een aantal waarnemingen voor de plantdichtheid per hectare en de rotatielengte.

Bron	Plantdichtheid per hectare (aantal stekken per hectare)	Rotatielengte (aantal jaar)
Meiresonne (2005)	10 000 – 15 000	3 - 5
VILT	10 000 – 20 000	3 - 5
INBO	10 000 – 30 000 (afhankelijk van afstand in de rij)	3
Innovatiesteunpunt voor land- en tuinbouw (2006)	10 000 – 20 000	3 - 4
Garcia <i>et al.</i> (2003)	10 000 – 20 000	3 - 5
Horizon (2007)	15 000	3
Geurds <i>et al.</i> (2006)	10 000 – 15 000	3
Dawson (2007)	10 000 – 20 000	3

Tabel 2: plantdichtheid per hectare en rotatielengte

Het gebruik van houtachtige gewassen zoals korte omloophout kent een aantal voordelen ten opzichte van andere energieteelten. Zo zorgen houtige gewassen voor een bodemverbeterend en beschermend effect. Bovendien nemen de snelgroeiende bomen veel nutriënten op waardoor de uitloging van nitraten naar het grondwater belemmerd wordt. Tenslotte vertonen wilgen en populieren een vrij grote metaaltolerantie waardoor het voor hen mogelijk is om een aanzienlijke hoeveelheid metalen op te nemen om zo het metaalgehalte in de bodem te reduceren. (Meersman en Pauwels)

De hoge productiekost en de beperkte beschikbare ruimte vormen een belemmering voor een verdere doorbraak van korte omloophout als energieteelt. Volgens het Vlaams Informatiecentrum over Land- en Tuinbouw is er op dit moment ook weinig bekend over de rendabiliteit van deze teelt op bedrijfsniveau.

Als stimulans voor het gebruik van korte omloophout als energieteelt heeft de Europese Unie verordening 2080/ 92 opgesteld. Deze verordening heeft onder andere als doel de overbodige landbouwarealen een alternatieve bestemming te geven door bebossing. (Ceulemans *et al.*, 2001) In het kader van deze verordening werd in Het Vlaams Klimaatbeleidsplan 2006-2012 als doelstelling geformuleerd dat er in Vlaanderen tegen 2010 100 hectare korte omloophout aangeplant dient te zijn als bijdrage aan de realisatie

van de Vlaamse hernieuwbare energiedoelstelling. In paragraaf 6.2.2.2 wordt de huidige situatie van korte omloophout in Vlaanderen besproken.

Tot voor kort was er verwarring of korte omloophout behoorde tot het bosdecreet of niet. Dit decreet verbood ontbossen, waardoor de landbouwpercelen hun bestemming van landbouwgrond verloren en 'bos' werden. Op 1 juli 2006 kwam er verandering in deze situatie door de wijziging van het bosdecreet. Korte omloophout werd omschreven als 'de teelt van snelgroeiende houtachtige gewassen waarbij de bovengrondse biomassa periodiek tot maximaal acht jaar na de aanplanting of na de vorige oogst, in zijn totaliteit wordt geoogst'. Het Verzameldecreet bepaalt dat dergelijke teelten niet meer aan het Bosdecreet onderworpen zijn. Hierdoor kan korte omloophout als een landbouwteelt beschouwd worden. (Vereniging voor Bos in Vlaanderen, 2006)

2.3 Voorbehandeling van korte omloophout

Afhankelijk van de aard van de biomassa en het omzettingssysteem dat gebruikt wordt, zal de biomassa in meer of mindere mate voorbehandeld dienen te worden. (Coenen *et al.*, 2008) Deze voorbehandeling is nodig om het transport en opslag van de geoogste biomassa te vereenvoudigen of het rendement van de uiteindelijke energieomzetting te verbeteren. Soms dienen biomassa'stromen ook voorbehandeld te worden om conversie mogelijk te maken. Er zijn vier verschillende soorten voorbehandelingstechnieken, namelijk: drogen, verkleinen, verdichten en torrefactie. (Geurds *et al.*, 2005)

2.3.1 Drogen

De meeste biomassa uit de natuur is zowel voor gebruik als voor opslag veel te nat. (Geurds *et al.*, 2006) Een voldoende laag vochtgehalte is nodig om de kwaliteit van de biomassa te behouden. Voor het recupereren van energie kan drogen ook zinvol zijn. Dit is afhankelijk van de gewenste dichtheid en transportafstand. (Coenen *et al.*, 2008) In onderstaande tabel vindt u het gewenste vochtpercentage waarmee het korte omloophout in de pyrolyse-installatie of vergassingsinstallatie wordt ingebracht

Bron	Flash-pyrolyse	Vergassing
Bridgwater <i>et al.</i> (2002)	7 - 10%	

Putsche <i>et al.</i> (2006)	5 - 10%	
Siemons (2005)	5 - 15%	
Bridgwater <i>et al.</i>	10%	20%
Dawson (2007)		10%
Buchholz en Volk (2007)		15%

Tabel 3: gewenste vochtpercentage waarmee het korte omloophout in de pyrolyse-installatie of vergassingsinstallatie wordt ingebracht

2.3.2 Verkleinen

Men verkleint biomassa om aan de eisen van de energie-installatie te voldoen. Om kosten te besparen kan men best het verkleinen beperken tot het strikt noodzakelijke. Daarom is het voordelig om de ingangseisen van de energie-installatie voor de grootte van de biomassa te verruimen. Bij natte biomassa moet er gelet worden op het directe gebruik van de biomassa in de energie-installatie. Als de verkleinde, natte biomassa blijft liggen zal deze deels vergaan. (Coenen *et al.*, 2008) Bridgwater *et al.* (2002) vermelden dat bij snelle pyrolyse de deeltjesgrootte bij een wervelbedreactor groter dan 2 en kleiner dan 5 millimeter dient te zijn. Deze beperking wordt opgelegd om nevenreacties tussen de tijdens het pyrolyseproces gevormde damp en cokes te vermijden. Putsche *et al.* (2006) spreken van een maximale deeltjesgrootte van 1 tot 3 millimeter voor een wervelbedreactor voor pyrolyse. In een wervelbedvergasser ligt de deeltjesgrootte meestal tussen 0,1 en 1 millimeter. In de praktijk is er echter een deeltjesgrootte tot bijna 1 decimeter mogelijk. (Boerrigter *et al.*, 2004)

2.3.3 Verdichten

Bij het verdichten van biomassa wordt het volume verminderd, waardoor tegelijkertijd de energiedichtheid van het materiaal verhoogt. (Geurds *et al.*, 2006) Door deze methode te gebruiken kan men besparen op de transportkosten en kan het materiaal gemakkelijker opgeslagen worden. Het maken van balen en pellets zijn de bekendste technieken van verdichting. (Coenen *et al.*, 2008) Bij het verballen wordt gemaaid gras verpakt in balen waardoor het een grotere energiedichtheid heeft dan los hooi. Pellets zijn kleine, gelijkvormige stukjes geperste biomassa met een hogere energie- en massadichtheid.

Dit laatste vergemakkelijkt het transport. Om biomassa om te vormen tot pellets dient het materiaal erg droog te zijn, vervolgens wordt het kneedbaar gemaakt met stoom en geperst. (Geurds *et al.*, 2006)

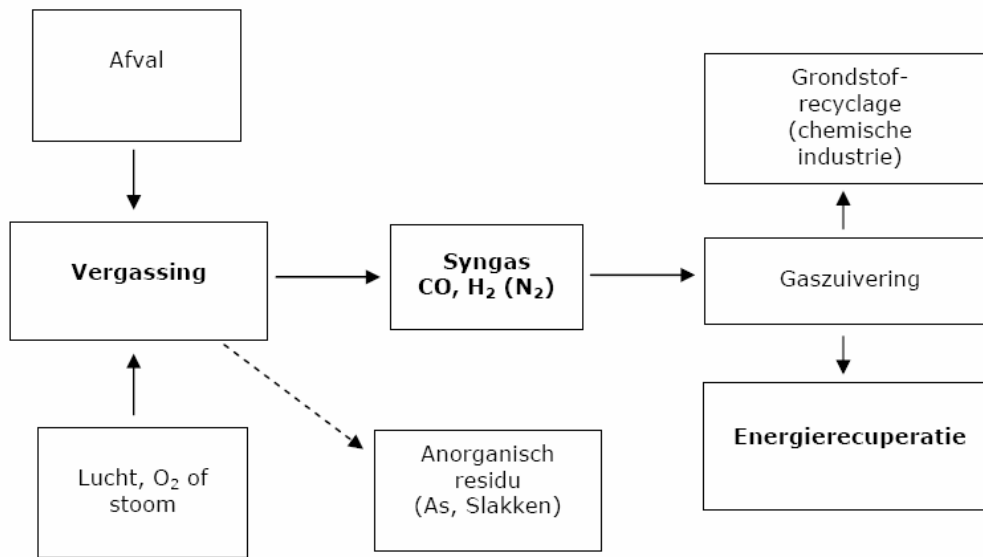
2.3.4 Torrefactie

Bij torrefactie wordt biomassa zonder toevoer van zuurstof tot 200°C – 300°C verwarmd. Er ontstaat een homogeen product dat bestaat uit 70% van het oorspronkelijke gewicht en uit 90% van de oorspronkelijke energiewaarde. Dit product beschouwt men als een kolenvervanger en kan gebruikt worden voor het meestoken in kolencentrales. Tijdens het proces komt er ook gas vrij. (De Vries *et al.*, 2008) Bij torrefactie kan er een heterogeen product verwerkt worden, hierdoor heeft deze techniek een groot voordeel ten opzichte van de andere conversiemethodes. Materialen die nog nat zijn worden het best voorgedroogd vooraleer men torrefactie toepast. (De Vries *et al.*, 2008) Torrefactie wordt voornamelijk toegepast op houtachtig materiaal zoals korte omloophout, maar enkel bij grote volumes. Bij kleinere volumes is de techniek immers niet rendabel. Torrefactie wordt momenteel echter enkel toegepast in proefcentrales. (Cogen Energy)

Hoofdstuk 3: Vergassing

3.1 Wat is vergassing?

Vergassing is een conversietechniek waarbij biomassa in vaste vorm wordt omgezet in een gasvormige brandstof die men stookgas of syngas noemt. Dit proces gebeurt bij een temperatuur tussen 700°C en 900°C. Van Stijn (2008) spreekt van een vergassingstemperatuur van 750°C tot 850°C gedurende een verblijftijd van 5 tot 10 seconden. Tijdens het proces wordt er slechts een kleine hoeveelheid lucht aangevoerd. (Vlaams Energieagentschap, 2007) Volgens een andere bron, afkomstig van het BBT-kenniscentrum VITO liggen de temperaturen bij vergassing tussen 750°C en 1 400°C. Het Energieonderzoek Centrum Nederland (2001) vermeldt dat de typische temperaturen van vergassing liggen tussen 800°C en 1 000°C. Wanneer men een zo hoog mogelijke omzetting van de biomassa wil bereiken, gecombineerd met een zo laag mogelijk teergehalte kiest men best voor een zo hoog mogelijke temperatuur. De omzetting komt tot stand door een partiële verbranding of oxidatie van de aanwezige koolstof. Vergassing kan men situeren tussen pyrolyse en verbranding, wat betreft de luchttoevoer (zie figuur 4). De aanwezige afvalstoffen worden thermisch gekraakt waardoor er een mengsel van voornamelijk CO, CO₂, H₂, CH₄, N₂ en H₂O in kleine hoeveelheden ontstaat. De gasfractie kan voor verschillende doeleinden gebruikt worden. Bij de verbranding van deze gasfractie is het mogelijk om energie te recupereren. De gasfractie kan echter ook als grondstof in de chemische industrie aangewend worden. Voor sommige toepassingen is het noodzakelijk om verontreinigingen zoals stof en roet uit het stookgas te verwijderen. De zuurstof die noodzakelijk is voor het vergassingsproces kan aangebracht worden in de vorm van lucht, zuivere zuurstof of stoom. Aan het einde van het proces blijven er anorganische stoffen achter als residu. (VITO, 2001)



Figuur 1: schematische voorstelling van het vergassingsproces
Bron: VITO (2001)

3.2 Type vergassingsreactoren

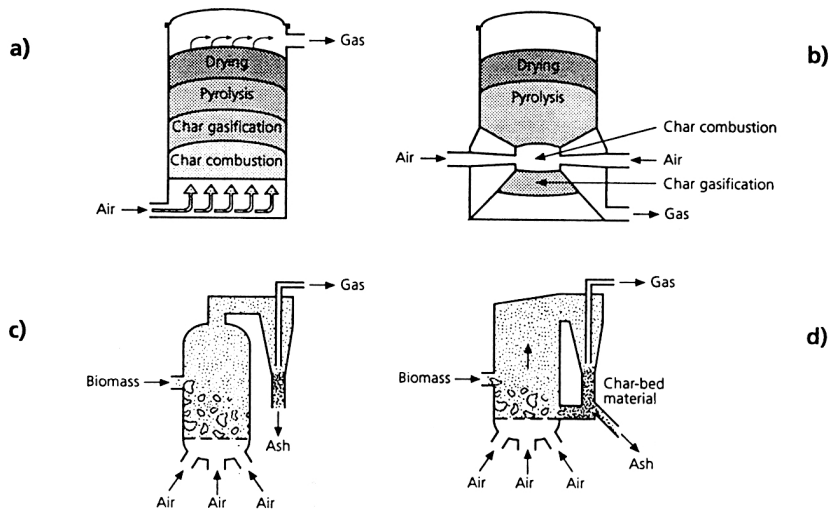
De gebruikte brandstof, de schaalgrootte van de installatie en de beoogde toepassing van het geproduceerde stookgas bepalen welke reactor het meest geschikt is. De verschillende types reactoren verschillen van mekaar wat betreft het type van brandstofbed, de manier van warmtetoevoer en het drukk niveau in de reactor.

Bij een vastbedreactor wordt de brandstof meestal vanboven toegevoegd. Doordat deze brandstof los ligt in de reactor, beweegt ze bij ontleding van de daaronder liggende brandstof naar beneden. In een wervelbedreactor worden de vaste brandstofdeeltjes door middel van een gasstroom vloeibaar gemaakt. Bij het derde type reactor, de entrained-flowreactor, gebeurt het transport van de brandstof pneumatisch.

De schaalgrootte van de installatie vormt geen beperking in een wervelbedreactor en in een entrained-flowreactor omwille van het hoge warmte- en massatransport.

De manier van warmtetoevoer aan de reactor kan direct (autotherm) of indirect (allotherm) gebeuren. Bij autotherme of directe vergassing wordt de warmte die nodig is voor het vergassingsproces opgewekt door verbranding van een deel van het te vergassen materiaal. Bij dit type vergassing gebruikt men als vergassingsmiddel meestal lucht, maar er bestaan ook toepassingen waarin men zuiver zuurstof of met zuurstof verrijkte lucht gebruikt. (Hemmes *et al.*, 2005) Bij allotherme of indirecte vergassing is

het vergassingsmedium zand. (Biomass Technology Group, 2005) Het merendeel van de vergassers wordt atmosferisch bedreven. Een lichte onderdruk of overdruk is noodzakelijk om het proces naar behoren te laten verlopen.



Figuur 2: verschillende types van vergassers: (a) vergasser met vast bed en opwaartse luchtstroom; (b) vergasser met vast bed en neerwaartse luchtstroom; (c) gewone wervelbedvergasser en (d) circulerende wervelbedvergasser

Bron: VITO

3.2.1 Vastbedvergassers

Het eerste type vergasser, de vastbedvergasser wordt atmosferisch met lucht bedreven en werkt meestal volgens het meestroom glijdend bedprincipe (luik b van figuur 2). Hierbij beweegt zowel het gas als de brandstof van boven naar beneden. Bij dit principe zijn de eisen wat betreft de kwaliteit van de brandstof hoog ten opzichte van wervelbedvergassers en tegenstroom glijdend bed vergassers. Het meestroom glijdend bedprincipe is enkel van toepassing voor kleine installaties tot enkele MW thermisch vermogen. De kwaliteit van het voortgebrachte stookgas is hoog in vergelijking met de kwaliteit van het stookgas bij tegenstroom glijdend bed vergassers en wervelbedvergassers. Bij tegenstroom glijdend bed vergassers (luik a van figuur 2) beweegt de brandstof van boven naar beneden en stroomt het gas van beneden naar boven. Het tegenstroom glijdend bedprincipe is enkel bruikbaar voor installaties tot enkele tientallen MW thermisch vermogen. Dit laatste genoemde principe wordt omwille van warmteopwekking in een aantal commerciële installaties gebruikt.

Er zijn verschillende variaties op het meestroom glijdend bedprincipe en het tegenstroom glijdend bedprincipe. Deze worden enkel bij een klein aantal vergassers gebruikt en hebben tot nu toe niet tot een marktdoorbraak van vastbedvergassers geleid. (Hemmes *et al.*, 2005)

3.2.2 Wervelbedvergassers

Wervelbedvergassers kan men opsplitsen in stationaire wervelbedvergassers en de circulerende wervelbedvergassers. De stationaire wervelbedvergasser vindt men terug in luik c van figuur 2, de circulerende wervelbedvergasser in luik d van dezelfde figuur.

Bij de eerste groep worden brandstof en inert bedmateriaal (meestal zand) gezamenlijk gefluïdiseerd door middel van het vergassingsmiddel dat met hoge snelheid toegevoegd wordt. Bij de tweede groep wordt het vergassingsmiddel met een bepaalde snelheid aangevoerd zodat het bedmateriaal en de brandstofdeeltjes circuleren in een systeem dat bestaat uit een cycloon, een reactorvat en een terugvoerpijp. Technische beperkingen wat betreft de schaalgrootte zijn er niet. Wervelbedvergassers worden doorgaans atmosferisch met lucht als vergassingsmiddel aangedreven. Het risico van as-agglomeratie (samenklontering van as) is laag omwille van de relatief lage vergassingstemperatuur (850°C). (Hemmes *et al.*, 2005) De berekeningen in de economische analyse van deze eindverhandeling gelden voor een wervelbedvergasser. Deze vergassers zijn vanaf een elektrisch vermogen van 2 MW_e immers geschikt voor alle groottes van biomassa. Bovendien is een wervelbedvergasser minder kieskeurig dan bijvoorbeeld een vastbedvergasser ten aanzien van de brandstofsoort en de structuur ervan. (Elbersen en Meeusen-van Onna, 2001)

3.2.3 Entrained-flowvergassers

Doordat de snelheid van het aangevoerde vergassingsmiddel zodanig hoog is wordt bij de entrained-flowvergassers de brandstof pneumatisch (aangedreven door luchtdruk) door de reactor verplaatst. Bij dit type van vergasser is het vereist dat de brandstof verpoederd wordt. Zuurstof wordt als vergassingsmiddel aangewend in plaats van lucht om een goede omzetting naar stookgas te kunnen bekomen. Enkel voor grootschalige installaties is vergassing met zuurstof op economisch vlak aantrekkelijk. In het geval van biomassavergassing is deze techniek in verband met brandstoflogistiek enkel in

bijzondere gevallen interessant. Het risico van as-agglomeratie is hoog omwille van een hoge vergassingstemperatuur (1 000 – 1 200°C). (Hemmes *et al.*, 2005)

3.3 Stookgas

3.3.1 Definitie stookgas

Het vergassingsproces heeft als eindproduct stookgas, dat men als een klimaatneutrale energiedrager beschouwt als het uit biomassa geproduceerd wordt. (ECN-rapport, 2002)
De samenstelling van stookgas is afhankelijk van het type vergassingsreactor waaruit het komt. Onderstaande tabel toont dit aan.

Type vergassingsreactor		Vastbed		Wervelbed	
		Tegenstroom	Meestroom	Statisch	Circulerend
	Eenheid				
Gemiddelde grootte installatie	kW _{th}	1 000	700	90	16 000
Toegelaten vochtgehalte biomassa	%vocht	52	6	14	15
H ₂	Vol%	14	21	9.3	14.8
CO	Vol%	20	22.5	15.8	15.4
CO ₂	Vol%	10	11.5	16.7	15
CH ₄	Vol%	2.5	1.5	3.8	4.2
C _n H _m	Vol%			1.6	2.0
N ₂	Vol%			52.8	39.6
Calorische waarde	MJ/ Nm ³	4.9	5.6	4.4	5.0

Tabel 4: samenstellingen en calorische waarden van stookgas uit vergassing van hout met lucht bij atmosferische druk

Bron: VITO

Vergassingsinstallaties proberen voortdurend de kwaliteit van het stookgas te verbeteren. Het stofgehalte en de teervorming, die afhankelijk zijn van het type vergassingsreactor, zijn het grootste probleem bij vergassing. Volgende tabel geeft de vervuilinggraden weer bij de verschillende type vergassingsreactoren.

Type vergassingsreactor		Vastbed		Wervelbed	
		Tegenstroom	Meestroom	Statisch	Circulerend
Stofgehalte					
Range	g/ Nm ³	0,1 - 3	0,02 - 8	1 - 100	8 - 100
Gemiddelde	g/ Nm ³	1	1	4	20
Teergehalte					
Range	g/ Nm ³	10 - 150	0,01 - 6	1 - 23	1 - 30
Gemiddelde	g/ Nm ³	50	0,5	12	8

Tabel 5: voorbeelden van stof- en teergehalte van stookgas uit vergassing van hout bij verschillende type vergassingsreactoren

Bron: VITO

Het stofgehalte is dus het hoogst bij een circulerende wervelbedreactor. Dit komt door de hoge stookgassnelheden en doordat het fijne stof (<10 µm) niet door een cycloon kan worden afgescheiden. Bij een tegenstroom vastbedvergasser heeft het stookgas het hoogste teergehalte. Het hete gas stroomt namelijk uit de oxidatiezone door een kouder brandstofbed waar pyrolyse en droging van de brandstof gebeurt. Hierbij zijn de temperaturen te laag om teren af te breken.

Stookgas kan gevaloriseerd worden of heeft de mogelijkheid om verwerkt te worden. Een eerste toepassing hiervan is de energierecuperatie in een klassieke stoomcyclus. Hierbij is er geen afkoeling of doorgedreven zuivering van het stookgas noodzakelijk. Een andere toepassing is de energierecuperatie door voeding aan een gasmotor, gasturbine of STEG-centrale. Bij dit proces is koeling en verwijdering van stof en teerachtigen nodig. De zuivering van stookgas kan bestaan uit een teerkraker, gevolgd door een cycloon, een warmtewisselaar, een sproeidroger, een doekfilter en een 2-traps gaswasser. Een laatste toepassing, die ook is opgenomen in figuur 1, is grondstofrecyclage door voeding aan de chemische industrie. Bij deze techniek is een relatief rijk stookgas en een doorgedreven verwijdering van stof en teerachtigen noodzakelijk. (VITO)

3.3.2 *Energiereducatie stookgas*

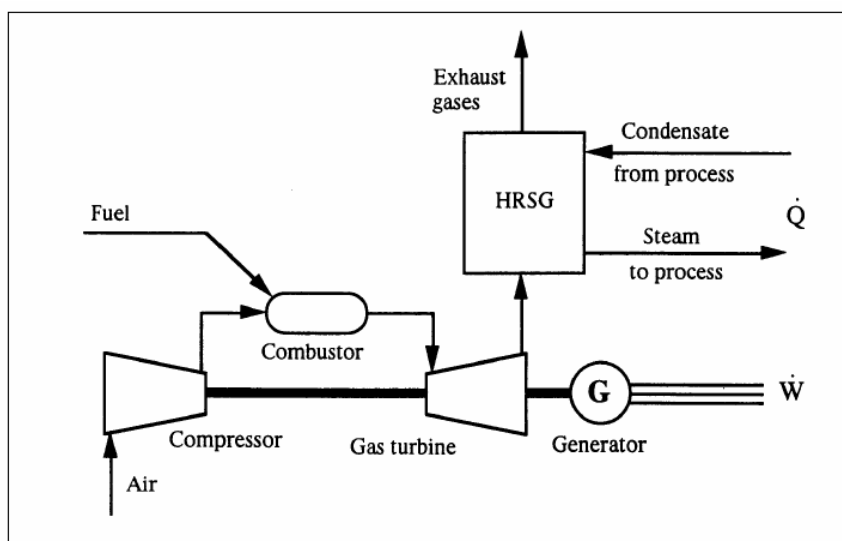
3.3.2.1 De gasmotor

Een gasmotor werkt volgens het viertaktprincipe. Hierbij zit er een zuiger, die vier werkslagen kent, in een cilinder. De aanzuigslag zuigt een mengsel van brandstofgas en

lucht aan. De samenpersing van dit mengsel gebeurt in de compressieslag. Net voor het einde van deze slag wordt het mengsel verbrand, waardoor de druk en de temperatuur stijgen. De expansieslag heeft als doel arbeid te leveren. In de vierde slag van de zuiger wordt het mengsel via een uitlaatklep afgevoerd naar het uitlaatsysteem. De meest recente gasmotoren zijn uitgerust met een turbocharger. Deze turbogasmotoren kunnen aanzienlijk meer vermogen leveren en ook het rendement neemt toe. (Biomass Technology Group, 2007) Er worden een aantal eisen gesteld aan het stookgas. Zo dient men voor de stookwaarde van het stookgas een ondergrens van 3 MJ/ Nm^3 te respecteren. De temperatuur mag niet hoger zijn dan 40°C om beschadigingen aan de compressor te vermijden. De relatieve vochtigheid van het stookgas mag maximum 80% zijn. De relatieve vochtigheid van het stookgas zonder naverwarming is echter 100%. In dit geval ontstaan er bij afkoeling van de aanwezige waterdamp condensdruppels die de compressor kunnen beschadigen. Een verlaging in dit percentage is mogelijk door naverwarming of door menging met droog aardgas. Best wordt een hoog asgehalte in het stookgas vermeden aangezien dit leidt tot de vervuiling van smeerolie waardoor de standtijd afneemt. Verder stelt men ook grenzen aan het gehalte van vervuilende componenten zoals chloor, zwavel en fluor. (Grift en de la Fontejne, 2007)

De gasmotor is een technologie die zijn nut al heeft bewezen voor diverse brandstoffen maar bij het stookgas dat afkomstig is van biomassa dient men stofdeeltjes, teer, halogenen en zuren te verwijderen. (Biomass Technology Group, 2007)

3.3.2.2 De gasturbine



Figuur 3: warmtekrachtkoppeling met gasturbine in open cyclus

Bron: Cogen Vlaanderen (2006)

In gasturbines kunnen verschillende brandstoffen worden toegepast zoals aardgas, stortgas en biogas. (Biomass Technology Group, 2007) De meeste van de huidige gasturbines werken volgens de open Brayton cyclus. (Cogen Vlaanderen, 2006) Lucht wordt aangezogen en gecomprimeerd. (Biomass Technology Group, 2007) Door de drukverhoging verhoogt ook de temperatuur. De gecomprimeerde lucht wordt naar de verbrandingskamer gevoerd. Hier wordt de brandstof aangebracht en op constante druk verbrand. Het proces dient plaats te vinden met een grote overmaat aan lucht. De uitlaatgassen worden naar de gasturbine gevoerd. In deze turbine wordt er mechanische arbeid geleverd waarmee men de compressor en een elektrische generator aandrijft. Warmterecuperatie is mogelijk aangezien de uitlaatgassen de turbine op een aanzienlijke temperatuur verlaten. (Cogen Vlaanderen, 2006)

3.3.2.3 STEG-centrale

Een STEG-centrale is opgebouwd uit een gasturbine, een recuperatiestoomketel, een stoomturbine en een alternator. (VITO, 2001) De gasturbine begint te draaien door hete verbrandingsgassen. Hierdoor wordt de alternator aangedreven en wordt er voor een eerste keer elektriciteit opgewekt. De hete uitlaatgassen verlaten de gasturbine en worden opgevangen in de recuperatiestoomketel. Daar wordt er stoom geproduceerd door de verhitting van een buizenstelsel waardoor water vloeit. De hete stoom doet de stoomturbine draaien, die op haar beurt een alternator activeert. Hierdoor wordt er opnieuw elektriciteit opgewekt. Het is ook mogelijk om een STEG-centrale te bouwen waarin de gas- en de stoomturbine eenzelfde alternator aandrijven. Dit wordt een single-shaft installatie genoemd. (Electrabel) Net zoals bij de gasmotor is het wenselijk dat het stookgas dat wordt ingezet in een STEG-centrale van zeer hoge kwaliteit is en weinig vervuilingen bevat. Ook worden er soortgelijke beperkingen opgelegd wat betreft de stookwaarde, de relatieve vochtigheid en het asgehalte van het stookgas. (VITO, 2001)

3.4 Vergunningen

Het is onmogelijk om een conversiecentrale voor biomassa uit te baten zonder bouw- en milieuvergunning. In VLAREM I (2008) wordt de procedure beschreven die men moet doorlopen wanneer men een milieuvergunning wil verkrijgen. Binnen dit uitvoeringsbesluit wordt er een onderscheid gemaakt tussen biomassa, waaronder de

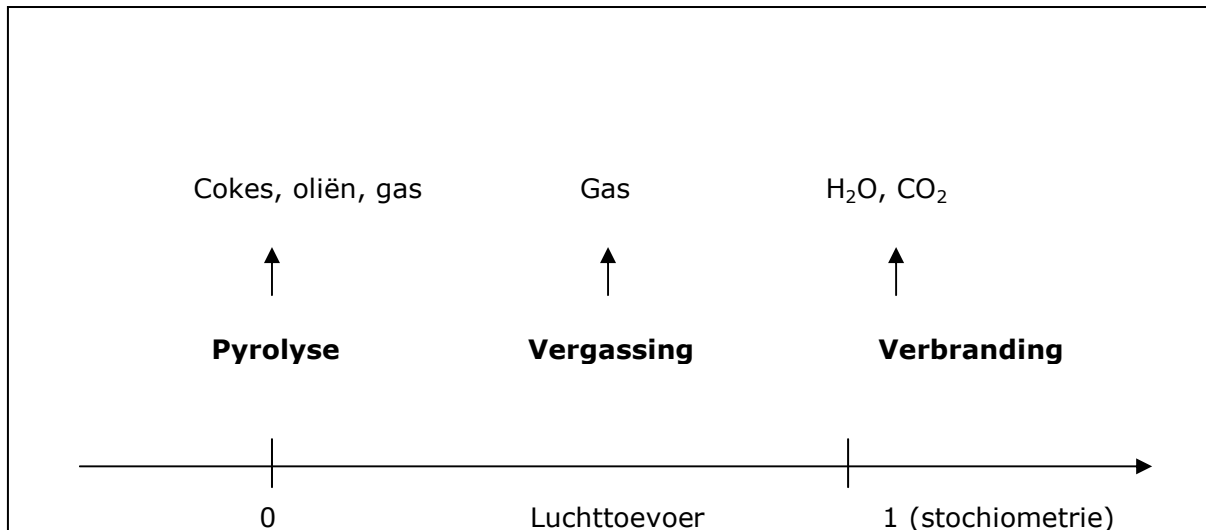
energieteelten vallen, en biomassa-afval. De verbranding van biomassa blijkt vergund te worden als stookinstallatie terwijl de verbranding van biomassa-afval als afvalverbranding vergund wordt. Wat betreft emissies kennen biomassa en biomassa-afval wel dezelfde reglementering. De emissie-eisen waaraan de conversiecentrale moet voldoen zijn afhankelijk van het type brandstof dat gebruikt wordt en het vermogen van de installatie. (Geurds *et al*, 2006)

3.5 Emissies

Bij vergassing ontstaan er enkel emissies tijdens de verbranding van het geproduceerde stookgas. Indien men een NO_x-brander installeert kan men de emissie van stikstof beperken. (VITO, 2001) Indien de biomassa die in de vergassingsinstallatie verwerkt wordt vervuild is dient men een extra investering te doen in een rookgasreiniger. In de loop van het jaar 2009 is men zelfs verplicht om bij elke WKK-installatie een rookgasreiniger te installeren. De eisen aan de uitstoot van stikstofoxiden en methaan worden immers strenger. Verder dienen de rookgassen gedurende het hele jaar te worden gereinigd. (Agro, 2008) De rookgasreiniger bij de vergassing van biomassa bestaat uit een doekenfilter en een natte gaswasser. (VITO, 2001)

Hoofdstuk 4: Pyrolyse

4.1 Wat is pyrolyse?



Figuur 4: luchttoevoer bij pyrolyse, vergassing en verbranding

Bron: Selinger (2001)

Pyrolyse is een thermisch proces waarbij de moleculen van een organisch materiaal, onder invloed van een verhoogde temperatuur, gekraakt worden. Opdat er geen verbranding kan optreden gebeurt dit proces in de afwezigheid van zuurstof. (Siemons, 2005) Pyrolyse wordt uitgevoerd bij temperaturen tussen 450°C en 750°C. Bij deze temperatuur ontleden hogere koolwaterstoffen tot componenten met een lagere molecuulmassa. Hierbij ontstaat een condenseerbare fractie (water en olie), een niet-condenseerbare fractie (gas) en pyrolysecokes. (Selinger, 2001)

Bridgwater *et al.* (2002) aanzien pyrolyse eerder als een voorbehandelingstechniek dan als een verwerkingstechniek. De uitvoering van pyrolyse als voorbehandeling biedt een aantal voordelen. Ten eerste wordt de biomassa omgezet in meer homogene fracties, hetgeen verdere verwerking vergemakkelijkt. Het homogene karakter laat bijvoorbeeld een beter controleerbare verbranding toe. Eventueel kunnen de fracties nog gezuiverd worden. Ten tweede wordt pyrolyse uitgevoerd bij relatief lage temperaturen in een reducerende atmosfeer. Hierdoor komen de meeste metalen in niet-geoxideerde vorm voor in de cokes. Dit laat toe om ze in relatief zuivere vorm gedeeltelijk uit de cokes te

verwijderen, alvorens deze cokes verdere verwerking ondergaan. Zo kunnen de cokes verbrand worden waardoor er warmte voor het pyrolyseproces ontstaat. (Bridgwater *et al.*, 2002) Dit wordt ook vermeld door Putsche *et al.* (2006). In de Bio Oil Exploitation NV in Tessenderlo worden alle cokes verbrand om de pyrolyse reactor op te warmen. De overgebleven warmte wordt gebruikt tijdens het drogen van de biomassa. (Van Stijn) Momenteel wordt het commercieel gebruik van cokes nog onderzocht voor een aantal toepassingen. (Barynin, 2007) Cokes zouden in staat moeten zijn om de regeneratie van CO₂ in de bodem te vergemakkelijken. De cokes die in de bodem worden aangebracht slaan de aanwezige CO₂ op voor een lange periode, waardoor de biologische koolstofkringloop vertraagd wordt. Verder kan de productiviteit in de landbouw verhoogd worden door cokes te gebruiken bij bemesting. (Downie, 2007) Cokes worden ook gebruikt als koolstofrijke grondstof voor de bereiding van actieve kool. Dit is een absorberend product dat kan aangewend worden voor de behandeling van organische materialen die een hoge moleculaire lading en een zwakke polariteit hebben en voor zware metalen. Tenslotte zijn de procescondities zodanig dat uit de aanwezige chloor weinig oxides gevormd worden. (Brussels Green Tech, 2008) Door wassing kan chloride uit de cokes verwijderd worden. (Selinger, 2001)

Volgens Siemons (2005) is pyrolyse een voorbehandelingstechniek die het mogelijk maakt om energie, die uit biomassa ontstaat kosteneffectief te transporteren van de producent naar de eindgebruiker. Dit is het gevolg van de hoge dichtheid van pyrolyseolie die schommelt tussen 1,1 en 1,2 t/ m³ bij een stookwaarde van ongeveer 20 GJ/ m³. Dezelfde auteur vermeldt ook dat pyrolyse het mogelijk maakt om biomassa vooraf te reinigen van sommige vervuilde componenten, die achterblijven in de assen. Dit heeft tot gevolg dat de zuivere pyrolyseolie gebruikt kan worden in situaties waarin dit voor de oorspronkelijke vuile biomassa onmogelijk is.

4.2 Het pyrolyseproces

Het eigenlijke proces bestaat uit een aantal processtappen. In de eerste fase wordt de biomassa aangebracht nadat ze gedroogd en verkleind is. Hierna gaat men over tot de warmtetoever. De warmteoverdracht kan op verschillende manieren gebeuren: door partiële verbranding met een ondermaat aan lucht, door directe verwarming door toevoer van inerte gassen met een hoge temperatuur of door indirecte verwarming door warmtetoever via verwarmingspijpen of de wanden van de installatie.

Tijdens de derde fase vindt een ontleding plaats. De organische verbindingen in de input ontbinden door de energietoevoer in componenten met lagere molecuulmassa. De laatste fase behelst de scheiding van ontledingsproducten. Bij verhoogde temperatuur bestaan de ontledingsproducten uit vaste stoffen en gassen. De gasfase kan door koeling gescheiden worden in een condenseerbare fractie en een niet-condenseerbare fractie. Dit scheidingsproces kan eventueel vervangen of aangevuld worden door verdere thermische verwerking, zoals kraken. (Selinger, 2001)

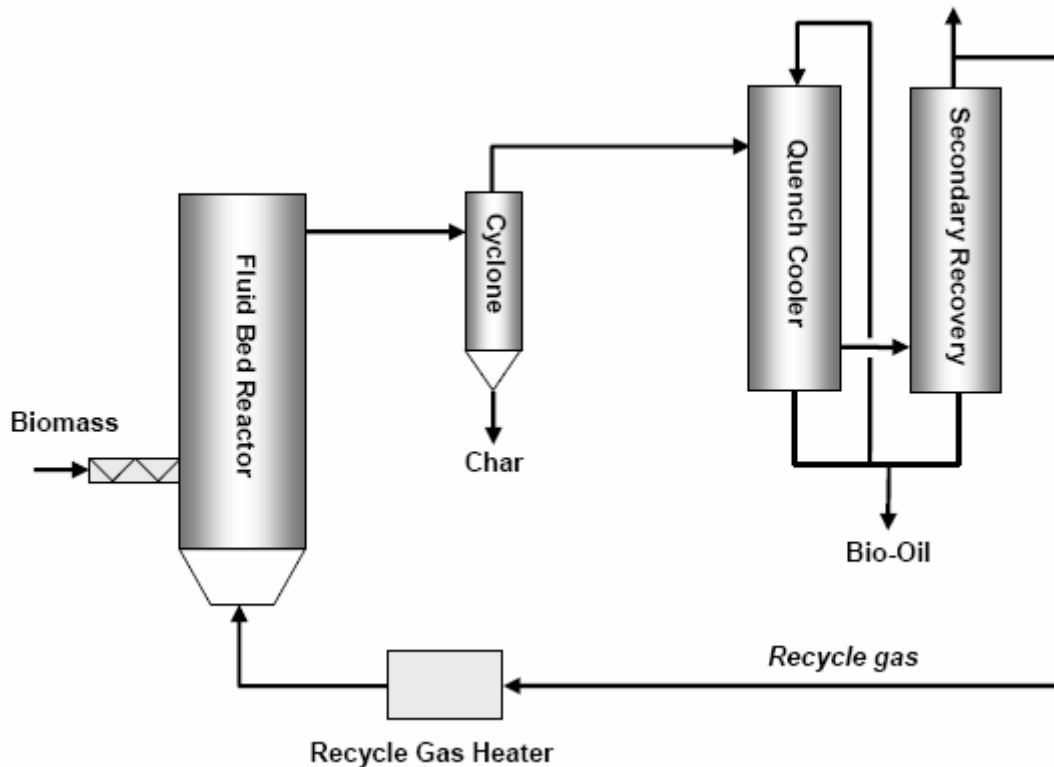
4.3 Type pyrolysereactoren

We onderscheiden reactoren met een vaste warmtedrager en zonder een vaste warmtedrager. Reactoren waarbij er gebruik wordt gemaakt van een vaste warmtedrager zijn het stationair wervelbed, het circulerend wervelbed en trommelpyrolyse. Ablatieve pyrolyse, vacuümpyrolyse en de actieve cycloon zijn pyrolysetechnieken zonder vaste warmtedrager. (Siemons, 2005) Het grote nadeel van de aanwezigheid van een vaste warmtedrager is dat deze de concentratie van de pyrolyse-olie met water verdunt. Verder versterkt de vaste warmtedrager de vorming van aerosols wanneer de processtroom thermisch wordt afgekoeld. Dit bemoeilijkt de vorming van pyrolyse-olie. (Putsche *et al.*, 2006) De meest populaire reactoren zijn de gefluidiseerde wervelbedreactoren. (Bridgwater *et al.*, 2002) In de volgende paragrafen komen trommelpyrolyse, ablatieve pyrolyse, vacuümpyrolyse en de actieve cycloon aan bod.

4.3.1 Stationair wervelbed

Het stationair wervelbed (fluidized bed) wordt gekenmerkt door een snelle transfer van warmte en een uniforme temperatuur in het wervelbed. Een reactietemperatuur tussen 500°C en 550°C resulteert normaal gezien tot de hoogste opbrengst aan pyrolyse-olie bij een verblijftijd van een halve seconde. Het stationair wervelbed wordt al meer dan 50 jaar gebruikt in de petroleum- en chemische sector en heeft bewezen een zeer betrouwbaar systeem te zijn. De proceswarmte van het stationaire wervelbed is vaak afkomstig van gerecycleerd pyrolysegas. Dit vereenvoudigt het ontwerp van de reactor maar resulteert ook in een lagere productie. Een hogere productiviteit kan bereikt worden via indirecte opwarming van het reactorzand (de vaste warmtedrager). De biomassadeeltjes die in de reactor worden ingebracht mogen niet groter zijn dan 2 tot 3 millimeter. Wanneer de biomassadeeltjes te groot zijn, zijn de cokes die overblijven na

het pyrolyseproces immers te zwaar om samen met de vaste warmtedrager en de pyrolyse-olie uit de reactor mee te worden gesleurd. Hierdoor ontstaat er een accumulatie aan cokes bovenaan het wervelbed. Daarom wordt er tijdens het ontwerp best gedacht aan voorzieningen om deze cokes te verwijderen. (Putsche *et al.*, 2006)

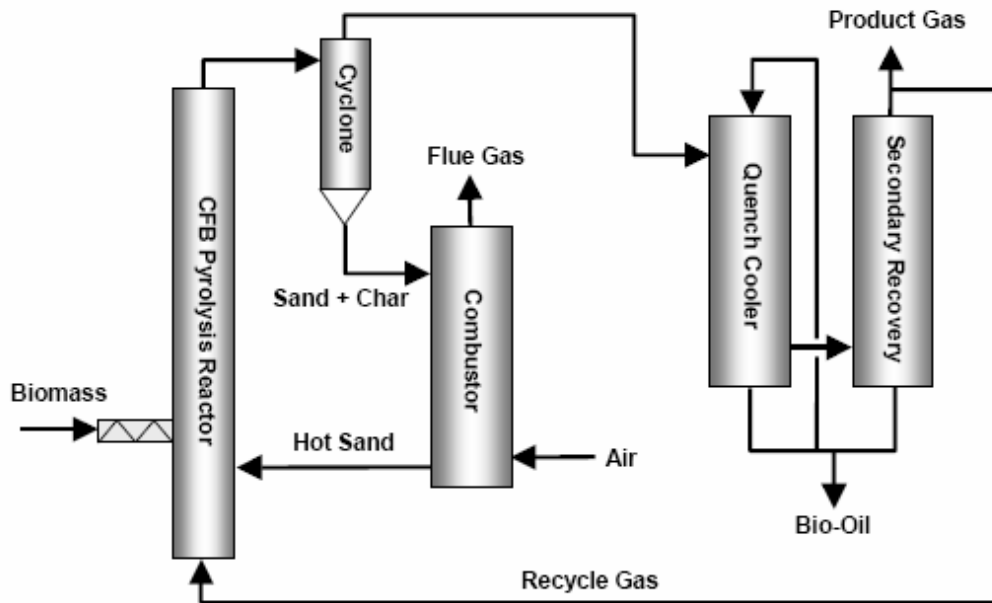


Figuur 5: processchema van een stationair wervelbed voor pyrolyse
Bron: Putsche *et al.* (2006)

4.3.2 Circulerend wervelbed

Bij het circulerend wervelbed worden grote hoeveelheden zand bewogen in en rond de verschillende vaten van de reactor. Er zijn in de loop der jaren verschillende reactors ontworpen die vooral verschillen in de manier waarop de warmte wordt aangevoerd. De oudere eenheden bestaan uit één indirect verwarmde reactor. De nieuwste ontwerpen bestaan uit twee reactoren. In de eerste reactor vindt het pyrolyseproces plaats terwijl in de tweede reactor de cokes worden verbrand in de aanwezigheid van zand. Hierna wordt het hete zand naar de pyrolyse reactor getransfereerd. Het grote nadeel aan dit systeem is de hoge energiekost voor het transport van het zand. Ook deze reactor legt beperkingen op aan de grootte van de biomassa deeltjes. Grote deeltjes worden niet

volledig gepyrolyseerd en komen terecht in de verbrander van de cokes. Dit heeft nadelige gevolgen voor de opbrengst aan pyrolyse-olie. De gewenste grootte van de deeltjes is ongeveer 1 tot 2 millimeter. De gemiddelde verblijftijd van de deeltjes schommelt tussen een halve en een volledige seconde. (Putsche *et al.*, 2006)



Figuur 6: processchema van een circulerend wervelbed voor pyrolyse

Bron: Putsche *et al.* (2006)

4.3.3 Trommelpyrolyse

Bij trommelpyrolyse pyrolyseert de brandstof in een metalen vat onder externe verhitting. De voeding wordt in een draaitrommel gebracht. Deze wordt luchtdicht afgesloten. Vervolgens wordt de voeding verhit waardoor deze pyrolyseert en omgezet wordt in een teerhoudend synthesegas en verkoold materiaal. (De Bruin)

4.3.4 Ablatieve pyrolyse

Een bekende toepassing van ablatieve pyrolyse is de Vortex-reactor. Deze reactor werd tussen 1980 en 1996 door NREL (het toenmalige SELI) ontwikkeld. Dit ontwerp had de mogelijkheid om biomassadeeltjes tot 20 millimeter te verwerken. De

reactortemperatuur was 625°C en de verblijftijd lag tussen 50 en 100 milliseconden. Het ontwerp van de vortex-reactor werd afgebroken in 1997 als gevolg van problemen die optraden bij de uitvoering van het proces en twijfels over de schaalbaarheid van de reactor. (Putsche *et al.*, 2006)

4.3.5 *Vacuümpyrolyse*

Vacuümpyrolyse is eerder geschikt voor het normale pyrolyseproces. De lagere verwarmingsnelheid resulteert in een lage opbrengst aan pyrolyse-olie in vergelijking met het gefluïdiseerd wervelbed. (Putsche *et al.*, 2006) Vacuümpyrolyse heeft als doel olie te verkrijgen door koolwaterstoffen, die vrijkomen wanneer de voeding in een luchtledige ruimte wordt verhit, te condenseren. (Lie) De reactor laat biomassadeeltjes tot 5 centimeter toe. (Putsche *et al.*, 2006) De voeding wordt in de reactor gebracht door middel van twee draaiende kleppen, de zogenaamde 'airlocks'. Tussen deze kleppen wordt de lucht die met de voeding meekomt weggezogen. De pyrolyse gebeurt bij een temperatuur van ongeveer 560°C. Er komen koolwaterstoffen vrij die worden afgezogen en afgekoeld, waardoor er pyrolyse-olie ontstaat. (Lie)

4.3.6 *Actieve cycloon*

De actieve cycloon wordt sinds de jaren '90 ontwikkeld aan de universiteit van Twente. Deze technologie is nauw verwant met die van het circulerende wervelbed. Bij de actieve cycloon wordt er immers ook gebruik gemaakt van warm zand vermengd met biomassa om de pyrolysereactie te beïnvloeden. Een opbrengst aan pyrolyse-olie tot 70% is mogelijk. De schaalbaarheid van dit soort reactor is echter onzeker. Selinger (2001) maakt verder nog een onderscheid tussen een enkelvoudig en een geïntegreerd pyrolyseproces. Bij een enkelvoudig proces gebeurt de valorisatie van de cokes off-site terwijl in een geïntegreerde installatie de cokes op de locatie worden verwerkt door middel van recuperatie, vergassing of verbranding.

4.4 Flash-pyrolyse

De onderlinge verhouding van de resulterende producten van pyrolyse wordt bepaald door de reactieparameters temperatuur, verwarmingsnelheid en verblijftijd.

Technologie	Verblijftijd	Verwarmings-snelheid	Temperatuur in °C	Eindproduct
Gewone pyrolyse	Uren	Laag	400 - 600	Cokes, vloeistoffen, gas
	5 - 30 minuten	Medium	700 - 900	Cokes, gas
Flash-pyrolyse	0,1 - 2 seconden	Hoog	400 - 650	Vloeistoffen
	< 1 seconde	Hoog	650 - 900	Vloeistoffen, gas

Tabel 6: gewone pyrolyse versus flash-pyrolyse

Bron: Selinger (2001)

Bij gewone (trage) pyrolyse worden vooral cokes gevormd, bij hoge warmtetoevoer en korte verblijftijden stijgt de opbrengst aan oliën en gassen. Een gematigde reactietemperatuur, een hoge verwarmingsnelheid en korte verblijftijd kunnen leiden tot een gewichtspercentage van 80% aan pyrolyse-olie. Onder deze omstandigheden spreken we van 'flash-pyrolyse'. (VITO) Volgens Brem en Brammer (2006) wordt er in de praktijk 45 tot 70% van de biomassa omgezet in vloeibare pyrolyse-olie, 10 tot 25% in char en 10 tot 30% in een niet-condenseerbaar gas. Bij flash-pyrolyse ligt het omzettingsrendement van biomassa naar pyrolyse-olie tussen de 40% en 60%. (VITO) Van Stijn (2008) spreekt van een omzetting van 70% in pyrolyse-olie, 20% in char en 10% in niet-condenseerbaar gas.

Het gebruik van deze technologie wordt echter beperkt door een aantal voorwaarden waaraan men moet voldoen. Volgens Vis (2002) mag de stukgrootte niet groter zijn dan 5 millimeter en mag de ingaande stroom een vochtgehalte van ten hoogste 10% hebben. Dit percentage sluit aan bij de gegevens die we in tabel 3 verzamelden. De meeste reststromen hebben een hoger vochtgehalte dan deze 10% waardoor een voorafgaande droging vaak noodzakelijk is. (Vis, 2002) Bij het ontwerp van de reactor dient rekening gehouden te worden met de hete pyrolyse-olie dampen die zeer reactief zijn en zeer snel

naar gas omgezet kunnen worden. Daarom moet de verblijftijd van deze gassen kleiner zijn dan 1 seconde. (VITO)

In Nederland verkregen TNO en de Universiteit van Utrecht een patent voor een nieuw type reactor voor flash-pyrolyse, namelijk de PyRos. Dit is een cycloonreactor met een geïntegreerde roterende deeltjesfilter. In de reactor kunnen tegelijkertijd het pyrolyseproces en de scheiding plaatsvinden. Deze techniek leidt tot een hoge olieopbrengst en een lage investeringskost. (Brem en Bramer, 2006)

4.5 Pyrolyse-olie

Pyrolyse-olie wordt verkregen door de pyrolyse van biomassa. Vaak worden pyrolyse-olie en bio-olie als twee synoniemen beschouwd, maar aangezien bio-olie ook verkregen kan worden door extractie en verestering van olie uit koolzaad is dit gebruik ervan niet geheel correct. (Biomass Technology Group, 2007) Om verwarring te vermijden wordt in het verdere verloop van dit werk de term pyrolyse-olie gebruikt voor de olie die ontstaat tijdens het pyrolyseproces.

Met behulp van het pyrolyseproces is het mogelijk om uit biomassa een homogeen product te maken: pyrolyse-olie (Siemons, 2005) De toepassingsmogelijkheden van pyrolyse-oliën zijn groot, omdat ze nagenoeg dezelfde eigenschappen hebben als fossiele oliën, waardoor er vaak geen of slechts beperkte aanpassingen nodig zijn aan verbrandingsketels of motoren om ze geschikt te maken voor de toepassing van pyrolyse-olie. (Twence) De meest eenvoudige toepassing is de verbranding van pyrolyse-olie in een boiler of oven om zo warmte te produceren. Verder is het mogelijk om pyrolyse-olie te gebruiken als brandstof voor het genereren van elektriciteit in een dieselmotor of gasturbine. Om economisch rendabel te worden zal deze technologie nog verder ontwikkeld moeten worden. Pyrolyse-olie kan ook als brandstof dienen voor transport mits upgrading van de olie zelf of aanpassingen aan het voertuig. (Biomass Technology Group) De energiedichtheid van pyrolyse-olie is vier tot vijf keer hoger dan die van ruwe biomassa. (Biomass Technology Group, 2007) Volgens Van Stijn (2008) is de energiedichtheid van pyrolyse-olie 18 GJ/m³ Dit wordt bevestigd door Van Swaaij. Putsche *et al.* (2006) gaan uit van een energiedichtheid van 17,9 GJ per 1 000 liter. Deze hoge energiedichtheid vergemakkelijkt het transport van pyrolyse-olie over grote afstanden. De productie van pyrolyse-olie kan immers plaatsvinden op een locatie waar biomassa in grote hoeveelheden aanwezig is, terwijl de conversie van de olie plaats kan

hebben op locaties waar er behoefte is aan duurzame energie. Dit fenomeen noemt men ont koppeling van productie en conversie. (Biomass Technology Group, 2007)

Een niet-energetische toepassing van pyrolyse-olie is de productie van de zogenaamde 'liquid smoke'. Liquid smoke kan bijvoorbeeld gebruikt worden om de smaak van voedingsproducten te verbeteren. (Moeller en Ramakrishnan, 2002)

4.6 Emissies

Enkel tijdens de verbranding van de pyrolyseproducten ontstaan er luchtmissies. Net zoals bij vergassing kan er een NO_x-brander aangewend worden om de stikstofemissies te beperken. (VITO, 2001)

4.7 Warmtekrachtkoppeling

Een warmtekrachtkoppeling (WKK) is een gecombineerde productie van elektrische of mechanische en nuttige thermische energie, uitgaande van dezelfde primaire energiebron. (Cogen Vlaanderen, 2006) Of eenvoudiger gezegd, warmtekrachtkoppeling is de gecombineerde en gelijktijdige productie van warmte en elektriciteit. (Cogen Vlaanderen) Het grote voordeel van een WKK ten opzichte van de gescheiden productie van elektriciteit en warmte is de veel betere benutting van de in de brandstof aanwezige energie. Hierdoor heeft een warmtekrachtkoppeling beduidend minder brandstof nodig dan bij de gescheiden productie van warmte en elektriciteit. Het merendeel van de WKK's werken op fossiele brandstoffen, maar het is ook mogelijk om hernieuwbare energiebronnen zoals biomassa of biogas als brandstof te gebruiken. De gebruikelijke manier om de behoefte aan warmte en elektriciteit te vervullen is het aankopen van elektriciteit uit het net en het genereren van warmte door een brandstof te verstoffen in bijvoorbeeld een verwarmingsketel of stoomketel. Door het gebruik van een warmtekrachtkoppeling kan men echter een niet te verwaarlozen hoeveelheid brandstof besparen. Bij conventionele elektriciteitscentrales gaat immers veel warmte verloren door lozing aan de atmosfeer via koelcircuits en uitlaatgassen. Een groot deel van deze warmte zou gebruikt kunnen worden om aan de warmtevraag te voldoen. Zo zou bij de overgang van een klassieke elektriciteitscentrale naar een

warmtekrachtkoppelingssysteem de brandstofbenutting stijgen van zo'n 30 tot 55% naar 80 tot 90%. (Cogen Vlaanderen, 2006)

Bij de conventionele opwekking van warmte gebeurt de productie van warmte op een niet al te hoge temperatuur. Er is hier dus sprake van een omzetting van een energievorm van hoge kwaliteit, de brandstof, naar een energievorm van lage kwaliteit, warmte op lage temperatuur. De energieverliezen bij gescheiden warmteproductie mogen dan wel beperkt zijn, de kwaliteitsverliezen en exergieverliezen zijn aanzienlijk. (Cogen Vlaanderen, 2006) Onder exergie verstaat men de maat voor nuttige arbeid die uit een brandstof of energiestroom kan gehaald worden. (Commissie Benchmarking Vlaanderen, 2007) Bij een WKK wordt de hoogwaardige warmte (1 200°C) die vrijkomt bij het verbranden van de brandstof eerst gebruikt voor het produceren van mechanische energie. Deze wordt dan verder via een alternator in elektriciteit omgezet. De overblijvende laagwaardige restwarmte (500°C) wordt dan gebruikt om te voldoen aan de specifieke warmtevrage van een bedrijf, een ziekenhuis,... (Cogen Vlaanderen, 2006)

De meest bekende technologieën voor warmtekrachtkoppeling zijn de stoomturbine, de gasturbine en de inwendige verbrandingsmotor. Het systeem van de stoomturbine bestaat uit een warmtebron, een stoomturbine en een warmteafvoer. De meest gebruikte warmtebron is een boiler. Deze boiler is geschikt voor de meeste types brandstoffen of combinaties ervan. Ook nucleaire reactoren kunnen als warmtebron gebruikt worden. Hetzelfde geldt voor hernieuwbare energie zoals biomassa en geconcentreerde zonnestraling. Stoomturbinesystemen kennen een hoge betrouwbaarheid, een hoge beschikbaarheid en een lange levenscyclus. De gasturbine is de meest gebruikte technologie in recente warmtekrachtinstallaties van gemiddeld tot hoog vermogen en komt voor in een enkelvoudige of gecombineerde cyclus. Het elektrisch vermogen van deze installatie varieert van enkele MW_e tot meerdere honderden MW_e. Recente onderzoeken en recente ontwikkelingen zijn er op het gebied van de microturbines. Deze werken volgens hetzelfde principe als de grote WKK-toepassingen: de aangezogen lucht wordt eerst gecomprimeerd in een compressor en daarna verhit in een verbrandingskamer. Hierna wordt een brandstof verbrand waardoor er rookgassen ontstaan. Deze gassen worden geëxpandeerd over een turbine. Zo ontstaat er elektriciteit, die gebruikt kan worden voor de aandrijving van de compressor maar ook voor de productie van elektriciteit via de alternator. Zuigmotoren met inwendige verbranding staan bekend om hun hoge rendementen, zelfs bij de eerder kleine uitvoeringen. Een aantal eigenschappen, zoals een hoge beschikbaarheid en een hoge

geschiktheid voor een groot aantal vloeibare en gasvormige brandstoffen, hebben ervoor gezorgd dat dit type van warmtekrachtkoppeling het meest gebruikt wordt in de commerciële en industriële sector. Hier tegenover staan polluerende emissies zoals NO_x en SO_x, hoog lawaainiveau en hoge onderhoudskosten. (Cogen Vlaanderen, 2006)

Naast de goede benutting van de in de brandstof aanwezige energie biedt het gebruik van een WKK nog een aantal belangrijke voordelen. Zo bestaat de mogelijkheid om een WKK te voorzien van brandstof afkomstig van een hernieuwbare energiebron. Bij zo een uitvoering maakt men gebruik van een milieuvriendelijke brandstof die bovendien optimaal benut wordt. Door de toename van het aantal warmtekrachtkoppelingen is er sprake van een meer decentrale productie van elektriciteit. Hierdoor verminderen de transportverliezen en de afhankelijkheid van één centrale. (Cogen Vlaanderen, 2006)

Een warmtekrachtkoppeling is vooral interessant voor bedrijven die nood hebben aan warmte en elektriciteit tegelijk. Toepassingen op grote schaal vinden we onder meer terug bij metaalverwerkende bedrijven, raffinaderijen en in de petrochemie. Op kleine schaal bestaan er ook een aantal WKK-toepassingen zoals in ziekenhuizen, zwembaden of in de tuinbouw. Na de bloeiperiode van de jaren '90 werden er tussen 2000 en 2005 nog maar weinig projecten gerealiseerd. Dit was onder andere te wijten aan de vrijmaking van de energiemarkten, de stijgende gasprijs en het aanslepen van de invoering van het certificatenstelsel dat het gebruik van een WKK economisch interessant moet maken. De verwachting is dat er in de toekomst weer meer investeringen zullen gebeuren in warmtekrachtkoppelingen, want de certificatenregeling is nu definitief goedgekeurd. (Cogen Vlaanderen, 2006)

4.8 Fiscale voordelen en subsidies WKK

In België kunnen de subsidies opgedeeld worden in twee types. De investeringssubsidies zijn proportioneel met het initieel investeringsbedrag en zijn slechts eenmalig. De uitbatingsubsidies zijn proportioneel met de energetische prestatie van de installatie en lopen over een langere tijd. (Cogen Vlaanderen, 2006)

De investeringsaftrek is een investeringssubsidie van het federale Ministerie van Financiën. De subsidie stelt bedrijfswinst en baten vrij van belasting, voor een bedrag dat

gelijk is aan een bepaalde bedrijfsinvestering. Voor energiebesparende maatregelen geldt een verhoogd percentage. (Cogen Vlaanderen, 2006) Voor het aanslagjaar 2009 bedraagt dit percentage 15,5%. (Zeebroek, 2009)

Een andere investeringssubsidie is de ecologiepremie. Deze wordt door de Vlaamse Overheid verleend aan ondernemingen die ecologie-investeringen uitvoeren in het Vlaams Gewest. De warmtekrachtkoppeling behoort ook tot deze investering. Sinds kort wordt de ecologiepremie op een nieuwe manier toegekend. Vroeger werd er een premie toegekend aan elk dossier dat aan de voorwaarden voldeed, maar nu wordt de premie toegekend op basis van een call met wedstrijdformule. Om de grootte van de subsidie te berekenen worden enkel de extra investeringen, die noodzakelijk zijn voor het verwezenlijken van milieudoelinden in aanmerking genomen. De extra investeringen worden als een percentage van de in aanmerking komende investeringen uitgedrukt. Voor een klassieke WKK-installatie is dit percentage 30% van de totale investering, voor een WKK-installatie op hernieuwbare energie 50% van de totale investering. (Kinable en Zeebroek, 2007) Een kleine of middelgrote onderneming kan hier bovenop genieten van een steunpercentage van 40%, een grote onderneming ontvangt een steunpercentage van 20%. (Zeebroek, 2009)

Groenestroomcertificaten zijn uitbatingssubsidies die worden toegekend door de VREG aan producenten van elektriciteit uit hernieuwbare energiebronnen in Vlaanderen. Ook hiervoor komt de WKK-producent in aanmerking. Eén certificaat toont aan dat er 1 000 kWh elektriciteit werd opgewekt uit een hernieuwbare energiebron. De producent kan de groenestroomcertificaten verkopen aan elektriciteitsleveranciers die aan hun certificatenverplichting moeten voldoen. Indien de producent zelf ook een leverancier is, kan hij de certificaten gebruiken om aan zijn eigen certificatenverplichting te voldoen. (VREG, 2007)

WKK-producenten hebben de mogelijkheid om bij de VREG warmtekrachtcertificaten te verkrijgen voor de warmtekrachtbesparing (primaire energiebesparing), die zij hebben gerealiseerd binnen het Vlaamse Gewest door middel van een kwalitatieve warmtekrachtinstallatie. De WKK-producenten kunnen deze warmtekrachtcertificaten gebruiken om aan hun certificatenverplichting te voldoen (indien de WKK-producent ook elektriciteitsleverancier is) of ze kunnen de certificaten verkopen aan

elektriciteitsleveranciers die nog aan hun certificatenverplichting moeten voldoen. Een warmtekrachtcertificaat toont aan dat 1 000 kWh primaire energie werd bespaard in een kwalitatieve warmtekrachtinstallatie, ten opzichte van de situatie waarin dezelfde hoeveelheid elektriciteit en/ of mechanische energie en warmte gescheiden worden opgewekt. (VREG, 2007)

VERGASSING EN PYROLYSE: STATE OF THE MONEY

Hoofdstuk 5: Kosten–batenanalyse

5.1 De netto contante waarde-methode

Mercken (2004) berekent bij de netto contante waarde (NCW) de huidige waarde van de kasstromen van een project door die kasstromen te verdisconteren tegen een gekende kapitaalkost k . Wanneer men resultaatbelastingen buiten beschouwing laat, kan de NCW omschreven worden als het maximale bedrag dat een onderneming zou kunnen betalen voor een investeringsopportunity zonder financieel slechter af te zijn.

$$\text{Netto contante waarde} = \sum_{t=1}^N \frac{VOKS_t}{(1+k)^t} - I_0 \quad (1)$$

met:

- $VOKS_t$ = vrije operationele kasstromen na belastingen in periode t
- I_0 = initiële investeringsbedrag
- N = economische levensduur van het project
- t = tijdsindex voor de perioden
- k = actualisatievoet

5.2 De totale investeringskosten

Een investering is de aanschaf van een kapitaalgoed zoals een bedrijfsgebouw of een machine met een levensduur die groter is dan een jaar. Het investeringsbedrag van een project bestaat uit alle eenmalige kosten die het project met zich meebrengt. In het algemeen tellen we naast de aanschaffingsprijs van de investering ook de bijkomende eenmalige kosten mee zoals opstartkosten, notariskosten en de kosten voor het opleiden van het personeel om met de nieuwe machines te werken. (Ochelen en Putzeijs, 2008)

5.3 De vrije operationele kasstromen (VOKS) en de actuele waarde

De ontvangsten en uitgaven die op verschillende momenten in de tijd gemaakt worden mogen niet met elkaar vergeleken worden. Elke euro die men nu bezit, kan onmiddellijk intrest opbrengen door gebruik te maken van opportuniteiten in de kapitaalmarkt. (Engelen *et al.*, 2004) Zo zijn gezinnen geneigd om hun consumptie uit te stellen wanneer ze hiervoor gecompenseerd worden door een hogere consumptie in de toekomst, dankzij de verkregen intresten. Bedrijven zijn dan weer bereid om intrest te betalen op de leningen die ze aangaan voor de financieringen van investeringen, omdat ze verwachten dat de opbrengst van de investering hoger ligt dan de kost ervan. (Ochelen en Putzeijs, 2008)

De euro die men nu bezit heeft dus een toekomstige waarde van meer dan één euro. Of anders gezegd, elke euro nu is meer waard dan een euro morgen.

Men kan dus de contante waarde van een toekomstige kasstroom gelijkstellen aan het product van deze kasstroom met een enkelvoudige disconto- of actualisatiefactor die altijd kleiner is dan één. (Engelen *et al.*, 2004)

Tijd	Actualisatiefactor(e.a.f.(t,k))
t=1	$\text{e.a.f.}(1,k) = \frac{1}{(1+k)}$
t=2	$\text{e.a.f.}(2,k) = \frac{1}{(1+k)^2}$
...	...
t=T	$\text{e.a.f.}(T,k) = \frac{1}{(1+k)^T}$

Tabel 7: actualisatiefactor

5.4 Netto contante waarde (NCW)

We kunnen dus stellen dat de NCW van een project gelijk is aan de huidige waarde van de ontvangsten min de huidige waarde van de uitgaven of de huidige waarde van de netto-ontvangsten min de initiële investeringsuitgave. Het is wenselijk dat de huidige waarde van de ontvangsten minstens even groot is als de huidige waarde van de uitgaven of dat de contante waarde van de netto-ontvangsten minstens even groot is als

de initiële investeringsuitgave. Met andere woorden, de NCW is minimum gelijk aan nul. (Engelen *et al.*, 2004)

5.5 Basisprincipes NCW-methode

Kenmerkend voor de NCW-methode is dat kasuitgaven voor intrestbetalingen niet worden opgenomen bij de bepaling van de relevante kasstromen. (Engelen *et al.*, 2004) Een voorbeeld kan dit laatste illustreren: stel dat iemand een lening aangaat van 10 000 EUR om een vijfjarig project te financieren met een intrestvoet van 10%. De initiële investeringskost van het project bedraagt 10 000 EUR. De jaarlijkse netto kasstroom is 7 000 EUR. Aan het einde van het vijfde jaar gebeurt de terugbetaling van $10\,000 * (1,1)^5 = 16\,105,1$ EUR aan de kredietverlener. Deze uitgave dient echter uitgedrukt te worden in termen van het jaar waarin de lening werd aangeaan. Met andere woorden, de uitgave moet met 5 jaar verdisconteerd worden. Dit geeft ons een netto contante waarde van nul. Bij de financieringsstroom is er dus sprake van een nuloperatie.

Financieringsstroom:

Jaar 1: ontvangst 10 000 EUR

Jaar 5: uitgave 16 105,1 EUR

$$\text{NCW financieringsstroom} = 10\,000 - \frac{(16105,1)}{(1,1)^5} = 0 \text{ EUR}$$

Projectstroom:

$$\text{NCW projectstroom} = -10\,000 + \frac{(7000)}{(1,1)^1} + \frac{(7000)}{(1,1)^2} + \dots + \frac{(7000)}{(1,1)^5} = 16\,536 \text{ EUR}$$

De terugbetaling van de lening in periode 5 wordt gefinancierd met de netto kasopbrengsten uit de projectstroom.

Om de relevante kasstromen te bepalen dienen enkel differentiële kasstromen in rekening te worden gebracht. (Engelen *et al.*, 2004)

Enkel fysieke geldstromen mogen in de analyse worden opgenomen. Dit wil zeggen dat kasstromen in de analyse worden opgenomen op het moment dat zij ontvangen, respectievelijk betaald worden en niet op het ogenblik van hun boekhoudkundige registratie. Ontvangsten uit verkopen vallen bijvoorbeeld niet per se samen met de realisatie van de verkopen zelf. Afschrijvingen zijn niet-kaskosten en veroorzaken geen geldstromen, behalve bij het realiseren van belastingsbesparingen.

Inflatie kan een sterke invloed hebben op investeringsbeslissingen. Zo is het mogelijk dat een project bij afwezigheid van inflatie zou worden aanvaard terwijl het in werkelijkheid zou moeten verworpen worden. Indien men bij de berekening van de NCW rekening wil houden met inflatie, dient men de nominale kasstromen om te zetten in reële kasstromen en deze te actualiseren tegen de reële kapitaalkost of dient men de nominale kasstroom te actualiseren tegen de nominale kapitaalkost. Tenslotte moet de invloed van belastingen in rekening worden gebracht bij de berekening van de NCW. (Engelen *et al.*, 2004) Daarom herschrijven we de formule (1) die in paragraaf 5.1 vermeld wordt als volgt:

$$NCW = [(1-b) \times (O_t - Q_t) + b (I_0/ n)] a_{n-r} - I_0 \quad (2)$$

met:

- b = belastingsvoet
- $r = (1-b) \times r^*$
- r^* = kapitaalkost vóór belastingen
- r = kapitaalkost na belastingen
- O_t = kasopbrengsten
- Q_t = kaskosten
- I_0 = initiële investering
- n = projectduur
- a_{n-r} = actualisatiefactor met $a_{n-r} = [1-(1+r)^{-n}] / (r)$

De belastingsvoet in deze case wordt gelijkgesteld aan 33%. (Portaal Belgische Overheid, 2008) De relevante intrestvoet voor bedrijven is de marginale opbrengstvoet van investeringen ofwel de return die men realiseert op bijkomende investeringen. De return op investeringen bedraagt ongeveer 10%. (Ochelen en Putzeijs, 2008) Wij hanteren in deze studie een kapitaalkost vóór belastingen van 10%. Bij Selinger (2001) en Thewys

en Kuppens (2008) vindt men een technische levensduur voor een pyrolyse-installatie van 20 jaar terug. Welink *et al.* (2007) spreken van een technische levensduur van 20 jaar voor een vergassingsinstallatie. Dit is ook de levensduur die in deze studie gebruikt wordt. De actualisatiefactor a_{n-r} is dan 10,8456. De invloed van belastingen op de NCW komt tot uiting in een belastingschild van intresten en een belastingschild van afschrijvingen. Het belastingschild van intresten wil zeggen dat de vennootschapsbelasting een positief effect heeft op de NCW van een project. Elke euro intrest die men betaalt is 1 euro extra kost waardoor de winst daalt met 1 euro en er dus b euro minder belasting moet betaald worden.

Een afschrijving is een boekhoudkundige kost die de winst negatief beïnvloedt. Hierdoor is het bedrag dat men aan belastingen moet betalen kleiner en zijn er minder uitgaven. Minder uitgaven betekent een positief effect op de NCW.

Belastingen hebben echter niet alleen een positieve invloed op de NCW, maar zij romen de kasstromen vóór belastingen af. Er blijft immers nog maar $(1-b)$ over van de kasstromen. Hierdoor daalt de NCW. (Mercken, 2004)

5.6 NCW-methode toegepast op onze gevalstudie

We passen onderstaande formule toe op onze gevalstudie:

$$NCW = [(1-b) \times (O_t - Q_t) + b (I_0/ n)] a_{n-r} - I_0$$

- de initiële investering I_0
= totale investeringskosten – ecologiepremie – verhoogde investeringsaftrek

- kasopbrengsten O_t

= opbrengsten uit de verkoop van geproduceerde elektriciteit (+ opbrengsten uit de verkoop van geproduceerde warmte) + subsidies en steunmaatregelen

- kaskosten Q_t
= de jaarlijkse werkingskosten van de producent

Voor vergassing:

= onderhoudskosten + personeelskosten + aanvoerkosten korte omloophout + verzekeringskosten + algemene overheadkosten + transport- en behandelingskosten van de assen + energiekosten

Voor pyrolyse:

= onderhoudskosten + personeelskosten + aanvoerkosten korte omloophout + verzekeringskosten + algemene overheadkosten + verwerkingskosten cokes + energiekosten

- de te betalen vennootschapsbelasting b (33%)
- de levensduur n van de installatie (20 jaar)



Hoofdstuk 6: Korte omloophout en energieopbrengst

6.1 Assumpties

Op basis van gegevens uit tabel 2 gaan we tijdens onze economische analyse uit van een plantdichtheid van 15 000 stekken per hectare en een rotatielengte van 3 jaar. Verder veronderstellen we een opbrengst aan biomassa van 10 ton droge stof per hectare per jaar.

6.2 Energieopbrengst

In deze paragraaf wordt uit de bruto energieopbrengst de netto energieopbrengst van korte omloophout berekend. Door contact (via e-mail) op te nemen met ingenieur Linda Meiresonne van het INBO kwamen we te weten dat Garcia *et al.* in 2003 een belangrijke publicatie omtrent dit onderwerp deden in opdracht van het Steunpunt Duurzame Landbouw.

Het verschil tussen de bruto- en de netto energieopbrengst is het energieverlies dat gepaard gaat met het telen, het oogsten en het transport van het korte omloophout. (Garcia *et al.*, 2003) Zoals eerder vermeld wordt een opbrengst aan korte omloophout van 10 ton per hectare per jaar verondersteld. De calorische waarde geeft aan hoeveel warmte een hoeveelheid droog materiaal afgeeft bij verbranding. (Geurds *et al.*, 2006) Dooms *et al.* (2006) vermelden dat korte omloophout een calorische waarde heeft van 18 GJ per ton. De bruto energieopbrengst van korte omloophout is dus gelijk aan 180 GJ per hectare per jaar.

6.2.1 Energiegebruik tijdens teelt en oogst

Tijdens het teelt- en oogstproces wordt er zowel directe als indirecte energie gebruikt. Men hanteert volgende formules:

$$EG_{\text{totaal}} = EG_{\text{direct}} + EG_{\text{indirect}} \quad (3)$$

$$EG_{\text{direct}} = EG_{\text{diesel}} + EG_{\text{smeermiddel}} \quad (4)$$

$$EG_{\text{indirect}} = EG_{\text{zaad}} + EG_{\text{machines}} + EG_{\text{kunstmest}} + EG_{\text{plantenbeschermingsmiddelen}} \quad (5)$$

met:

- EG_{totaal} : totale energie die tijdens het teelt- en oogstproces gebruikt wordt
- EG_{direct} : directe energie die tijdens het teelt- en oogstproces wordt gebruikt in de vorm van diesel en smeermiddelen
- EG_{diesel} : de energie die tijdens het teelt- en oogstproces wordt gebruikt onder de vorm van diesel
- $EG_{\text{smeermiddel}}$: de energie die tijdens het teelt- en oogstproces wordt gebruikt onder de vorm van smeermiddelen, lineair gecorreleerd met het dieselverbruik
- EG_{indirect} : indirecte energie die tijdens het teelt- en oogstproces wordt gebruikt via de productie van zaden, machines, kunstmest en plantenbeschermingsmiddelen
- EG_{zaad} : de energie die gebruikt wordt voor de productie, bewerking, opslag en verkoop van zaaizaden of pootmateriaal
- EG_{machines} : de energie die gebruikt wordt voor de productie van machines, lineair gecorreleerd met het dieselverbruik
- $EG_{\text{kunstmest}}$: de energie die gebruikt wordt voor de productie van kunstmest, lineair gecorreleerd met de verbruikte hoeveelheid
- $EG_{\text{plantenbeschermingsmiddelen}}$: de energie die gebruikt wordt voor de productie van plantenbeschermingsmiddelen, lineair gecorreleerd met de verbruikte hoeveelheid (Garcia *et al.*, 2003)

Bij de berekening van de totale energie die tijdens het teelt- en oogstproces wordt gebruikt dient men rekening te houden met de omstandigheden waarin de teelt en oogst gebeuren. Zo bestaat de mogelijkheid om de stammen van het korte omloophout onmiddellijk na de oogst te verkleinen. Men kan echter ook deze stammen eerst drogen op het veld alvorens over te gaan tot de verkleining ervan. Deze laatste methode heeft als voordeel dat er geen energie nodig is om het hout te drogen, de droging gebeurt immers op het veld, zonder tussenkomst van mens of machine. Bij velddroging wordt men echter geconfronteerd met een verlies aan droge stof van 4% voor wilg en van 13% voor populier. (Garcia *et al.*, 2003) Volgens ingenieur Linda Meiresonne is het enkel mogelijk om velddroging toe te passen wanneer men aan een aantal voorwaarden voldoet. Het hout dient gestapeld te worden op een verharde bodem en wordt bij voorkeur afgedekt met geo-textiel, om 'ademen' toe te laten. Het hout heeft een vochtigheidspercentage van 50% voor de velddroging. Na de velddroging ligt het

vochtigheidspercentage tussen 20 en 30%. (Garcia *et al.*, 2003) Tijdens onze berekeningen wordt er uitgegaan van velddroging en een vochtigheidspercentage na velddroging van 25%.

Onder deze omstandigheden verkrijgt men volgende resultaten:

$$EG_{\text{totaal populier}} = EG_{\text{direct populier}} + EG_{\text{indirect populier}}: 7\,400 \text{ MJ/ ha} + 3\,777 \text{ MJ/ ha} = 11\,177 \text{ MJ/ ha} \quad (6)$$

$$EG_{\text{totaal wilg}} = EG_{\text{direct wilg}} + EG_{\text{indirect wilg}}: 8\,150 \text{ MJ/ ha} + 3\,979 \text{ MJ/ ha} = 12\,129 \text{ MJ/ ha} \quad (7)$$

(Garcia *et al.*, 2003)

Verder houden we rekening met het verlies aan droge stof tijdens de velddroging. Voor populier gaat er zo 23,4 GJ per hectare verloren, voor wilg 7,2 GJ per hectare. Zo verkrijgen we een energieopbrengst na teelt en oogst van 145,42 GJ per hectare voor populier en van 160,67 GJ per hectare voor wilg.

6.2.2 Energiegebruik tijdens transport

Het geoogste korte omloophout wordt van het veld naar de vergassingsinstallatie of de pyrolyse-installatie vervoerd. In wat volgt gaan we na hoeveel energie er gebruikt wordt tijdens dit transport. Bij deze berekening beschouwen we een installatie waarvan de elektriciteitsoutput varieert van 5 tot 50 MW_e.

Met de volgende formule van Caputo *et al.* (2005) wordt nagegaan hoeveel ton droge stof biomassa er aangevoerd dient te worden om een bepaalde elektriciteitsoutput te genereren.

$$M = \frac{(W_{NE} * 3600 * OH)}{(\eta_e * LHV)} \quad (8)$$

met :

- W_{NE} = netto elektrische output (MW_e)

- M = aantal ton droge stof biomassa (tds/ jaar)
- η_e = elektrische efficiëntie
- LHV = onderste verbrandingswaarde (MJ/ tds)
- OH = aantal werkuren (u/ jaar)

Dornburg en Faaij (2001) en Siemons (2005) veronderstellen in hun berekeningen 7 000 werkuren per jaar. Caputo *et al.* (2005) gaat uit van 8 000 operationele uren per jaar. Tijdens onze case veronderstellen we 7 000 werkuren per jaar. De onderste verbrandingswaarde van hout is 18 000 MJ/ tds. De netto elektrische output laten we variëren van 5 tot 50 MW_e met stappen van 5 of 10 MW_e. De elektrische efficiëntie η_e is verschillend voor vergassing en pyrolyse.

6.2.2.1 Elektrische efficiëntie vergassing

Tabel 8 geeft een overzicht van de elektrische efficiëntie van het vergassingsproces op basis van verschillende bronnen. Het gaat hier om de efficiëntie waarmee de energie die in de biomassa aanwezig is wordt omgezet in elektriciteit.

Bron	Elektrische efficiëntie (%)
Office of Technology Assessment at the German Parliament (1997)	22 - 37
Carbolea	> 40
NETL	40 - 42

Tabel 8: elektrische efficiëntie van vergassingsinstallatie

Uit meerdere bronnen blijkt dat de elektrische efficiëntie van de vergassingsinstallatie varieert met het vermogen van de installatie. Een overzicht hiervan is terug te vinden in onderstaande tabel.

Vermogen vergassingsinstallatie (MW _e)	Caputo <i>et al.</i> (2005)	Bridgwater (1995)	Dornburg en Faaij (2001)	Larson en Williams (1996)
5	36%	24%	44%	36%
10	39%	30%	44%	37%

20	41%	37%	44%	37,5%
30	43%	41%	44%	38%
40	44%	43%	44%	39%
50	45%	45%	45%	41%

Tabel 9: elektrische efficiëntie van vergassingsinstallatie bij verschillende vermogens

Tijdens verdere berekeningen verkiezen we om verder te rekenen met een elektrische efficiëntie die varieert met het vermogen van de vergassingsinstallatie. We baseren ons hierbij op de cijfers van Caputo *et al.* (2005), omdat er bij deze bron geen extreme waarden voorkomen maar wel waarden die rond het gemiddelde van de andere bronnen liggen. Het invullen van deze waarden in formule (8) levert onderstaande tabel op.

Netto elektrische output W_{NE} (MW_e)	Aantal ton droge stof biomassa M (tds/ jaar)
5	19 444
10	35 897
20	68 292
30	97 674
40	127 273
50	155 556

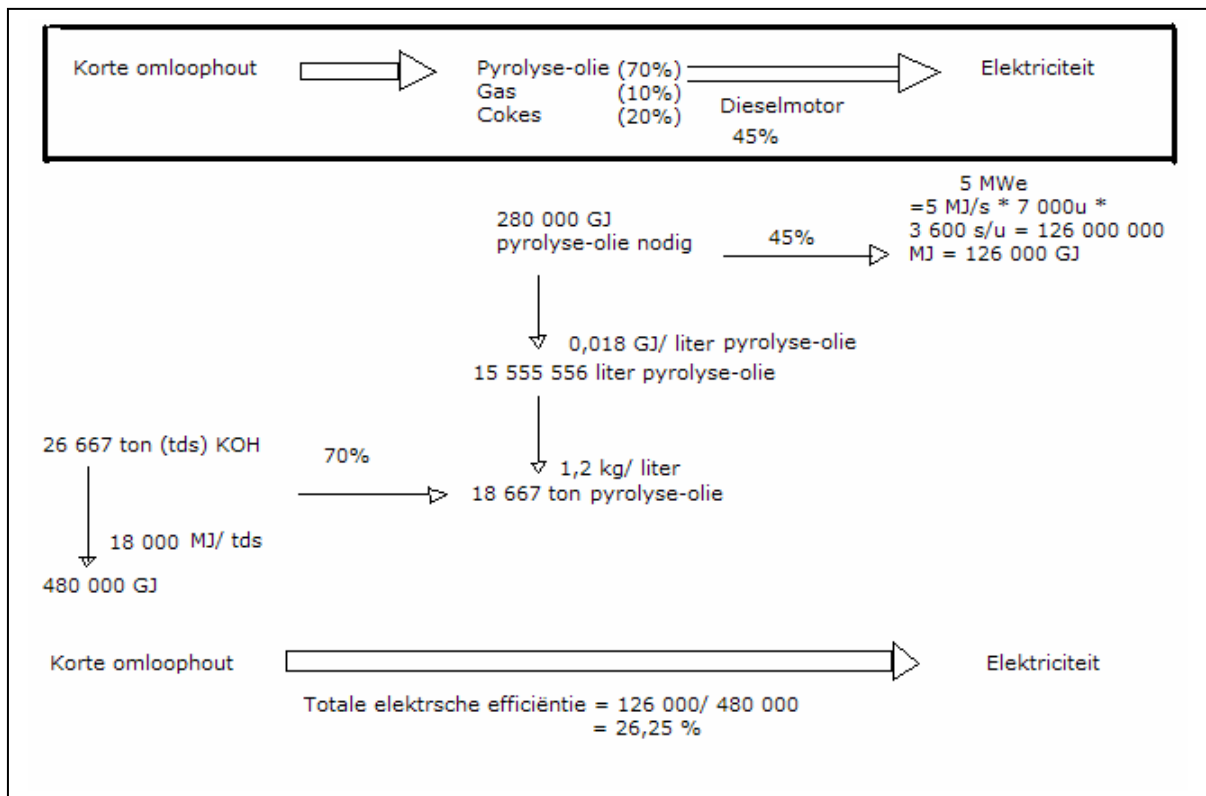
Tabel 10: omrekening elektrische output naar ton droge stof bij vergassing

6.2.2.2 Elektrische efficiëntie pyrolyse

Volgens VITO varieert de elektrische efficiëntie van pyrolyse tussen minimum 20% en maximum 30%. Bij Cogen Projects (2004) vinden we een elektrische efficiëntie van 25% terug.

In wat volgt zullen we zelf de elektrische efficiëntie van de omzetting van korte omloophout naar elektriciteit afleiden. We beschouwen twee fasen. In de eerste fase wordt de aangevoerde biomassa omgezet in pyrolyse-olie, cokes en een niet-condenseerbaar gas. De geproduceerde pyrolyse-olie wordt in de tweede fase omgezet in elektriciteit. In deze analyse wordt verondersteld dat de tweede fase plaatsvindt in een dieselmotor. Ter illustratie wordt de afleiding van de elektrische efficiëntie bij een pyrolyse-installatie met een capaciteit van 5 MW_e beschreven. Een capaciteit van 5 MW_e bij 7 000 operationele uren per jaar komt overeen met 126 000 GJ. Bij Bridgwater *et al.* (2002) vindt men voor een dieselmotor een elektrische efficiëntie van ongeveer 45%

terug. Om 5 MW_e elektriciteit te genereren is er dus 280 000 GJ (126 000 GJ/ 0,45) pyrolyse-olie nodig. Dit komt overeen met 15 555 556 liter olie, aangezien de energiedichtheid van de pyrolyse-olie 0,018 GJ per liter bedraagt. De dichtheid van de pyrolyse-olie is 1,2 kg per liter. Er is dus 18 667 ton pyrolyse-olie nodig om een elektriciteitsoutput van 5 MW_e te realiseren. Tijdens de eerste fase van het pyrolyseproces wordt op basis van gegevens van Van Stijn (2008) 70% van het aangevoerde korte omloophout omgezet in pyrolyse-olie. Er dient dus 26 667 ton droge stof korte omloophout aangevoerd te worden om 18 667 ton pyrolyse-olie en dus ook een elektrische output van 5 MW_e te realiseren. Aangezien de onderste verbrandingswaarde van hout 18 000 megajoule per ton droge stof bedraagt omvat 26 667 ton droge stof korte omloophout 480 000 GJ energie. De totale elektrische efficiëntie van dit pyrolyseproces is dus 26,25%. De schematische voorstelling van deze afleiding is terug te vinden in onderstaande figuur.



Figuur 7: schematische voorstelling pyrolyse-installatie met enkel opwekking elektriciteit

In tabel 11 wordt de hoeveelheid korte omloophout weergegeven die bij deze efficiëntie dient aangevoerd te worden om een bepaalde elektriciteitsoutput te genereren.

Netto elektrische output W_{NE} (MW_e)	Aantal ton droge stof biomassa M (tds/ jaar)
5	26 667
10	53 333
20	106 667
30	160 000
40	213 333
50	266 667

Tabel 11: omrekening elektrische output naar ton droge stof bij pyrolyse

Bij het Agentschap voor Bos en Natuur zijn er geen cijfers beschikbaar over het huidige areaal van korte omloophout in Vlaanderen. Het is ook onduidelijk welke machines het meest geschikt zijn voor de teelt van korte omloophout. (Departement Leefmilieu, Natuur en Energie, 2007) In 2006 werd er zo goed als geen biomassa geteeld voor de productie van biobrandstoffen. (Govaerts *et al.*, 2006) Volgens een studie van het Steunpunt Duurzame Landbouw kan de teelt van energiegewassen, olifantsgras en korte omloophout in Vlaanderen nooit een grote bijdrage leveren aan de energievoorziening in Vlaanderen. Tegen 2010 dient 6% van de Belgische elektriciteitsvoorziening met groene stroom te worden vervuld. Indien men één derde van dit percentage uit energiegewassen wil halen, is er hiervoor meer dan 100 000 hectare nodig. Momenteel ligt er echter slechts 8 000 hectare braak. Hiermee kan men slechts 0,025% van de vereiste 6% groene stroom halen. (Vlaams Parlement, 2007) Zoals vermeld in paragraaf 2.2 dient er in Vlaanderen tegen 2010 100 hectare korte omloophout aangeplant te zijn. Govaerts *et al.* (2006) gingen het theoretisch potentieel van energiegewassen in Vlaanderen na. Hierbij veronderstelden zij dat het landbouwareaal in de toekomst weinig zal wijzigen ten opzichte van het areaal in 2004. Op korte en middellange termijn (2010-2015) zijn de eerste generatie biobrandstoffen de belangrijkste bron voor de omzetting naar energie. Op lange termijn (2030) zullen ook de tweede generatie biobrandstoffen een rol spelen. Tot deze generatie biobrandstoffen behoren de gras- en houtachtige gewassen zoals olifantsgras, wilg en populier. De verwachting is dat de teelt voor eerste generatie biobrandstoffen zal verdwijnen en tegen 2030 volledig vervangen zal zijn door energiegewassen voor tweede generatie biobrandstoffen. De theoretisch beschikbare 170 850 hectare wordt ingedeeld in een areaal van 85 425 hectare voor energiemaïs en een even groot areaal voor korte omloophout. Dit komt overeen met 854 250 ton droge korte omloophout per jaar. (Govaerts *et al.*, 2006)

Momenteel slaagt men er in Vlaanderen dus niet in om aan de in deze studie gevraagde hoeveelheden korte omloophout uit tabel 10 en 11 te voldoen. Op lange termijn is dit mogelijk wel het geval. Voorlopig wordt er dan ook verondersteld dat het korte omloophout wordt geïmporteerd uit een buurland. Volgens Jacobs worden er in de buurlanden van België immers wel voldoende energiegewassen geteeld. In het jaar 2010 zal Nederland echter voor 96% afhankelijk zijn van ingevoerde brandstoffen. Dit probleem kan echter gedeeltelijk worden opgelost door het duurzaam invullen van de vraag naar energie en brandstoffen. (AgriHolland) Aangezien er in Nederland niet in de eigen energiebehoefte kan worden voorzien is het dus weinig waarschijnlijk dat er biomassa uit Nederland naar België kan worden geïmporteerd. Volgens Meiresonne (2006) heeft men in Nederland beslist om hout uit het buitenland in te voeren, aangezien het aanbod van populierenhout er beperkt is. In Frankrijk is er 220 000 hectare aan populierenbos. Er wordt jaarlijks 100 000 ton populierenhout geïmporteerd uit België en Luxemburg. Duitsland heeft een areaal aan populier van ongeveer 100 000 hectare. De import van populierenhout van Duitsland is groter dan de export ervan. In het Verenigd Koninkrijk heeft men 12 000 hectare populier. (Meiresonne, 2006) Helaas zijn er geen gegevens beschikbaar voor wilg.

Opmerkelijk is dat België populierenhout exporteert naar Frankrijk. Een mogelijke reden hiervoor is dat er in 2006 geen grote vraag naar populierenhout was. We stellen ons echter de vraag of het in de toekomst wenselijk is om populierenhout naar Frankrijk te exporteren. In de toekomst zal er immers steeds meer beroep dienen gedaan te worden op tweede generatie biobrandstoffen, waartoe korte omloophout behoort.

6.2.2.3 Berekeningen energiegebruik bij transport

Met behulp van de gegevens uit tabel 10 en 11 wordt het mogelijk om de oppervlakte van het energiegewas te berekenen. Hiervoor deelt men de gegevens, uit de tweede kolom van onderstaande tabellen, door de biomassaopbrengst per hectare. Rekening houdend met het verlies aan droge stof bij velddroging bedraagt deze opbrengst voor wilg 9,6 ton droge stof per hectare en voor populier 8,7 ton droge stof per hectare.

Netto elektrische output W_{NE} (MW_e)	Aantal ton droge stof biomassa M (tds/jaar)	Oppervlakte energiegewas wilg (ha)	Oppervlakte energiegewas populier (ha)
5	19 444	2 025	2 235

10	35 897	3 739	4 126
20	68 292	7 114	7 850
30	97 674	10 174	11 227
40	127 273	13 258	14 629
50	155 556	16 204	17 880

Tabel 12: oppervlakte energiegewas bij vergassing

Netto elektrische output W_{NE} (MW_e)	Aantal ton droge stof biomassa M (tds/ jaar)	Oppervlakte energiegewas wilg (ha)	Oppervlakte energiegewas populier (ha)
5	26 667	2 778	3 065
10	53 333	5 556	6 130
20	106 667	11 111	12 261
30	160 000	16 667	18 391
40	213 333	22 222	24 521
50	266 667	29 167	30 651

Tabel 13: oppervlakte energiegewas bij pyrolyse

De berekening van de benodigde oppervlakte van het aanvoergebied gebeurt als volgt:

$$\text{Oppervlakte aanvoergebied} = \text{oppervlakte energiegewas} / \text{percentage van aanvoergebied rond pyrolyse- of vergassingsinstallatie bestemd voor energiegewassen} \quad (9)$$

Volgens Garcia *et al.* (2003) wordt er 47% van de totale oppervlakte in Vlaanderen gebruikt voor landbouwteelt. Voor België bedraagt de totale landoppervlakte 30 528 km² of 3 052 800 hectare. Hiervan wordt er 1 370 285 hectare aangewend als landbouwgrond. Dit komt overeen met een afgerond percentage van 45%. (Algemene Directe Statistiek en Economische Informatie, 2008)

Garcia *et al.* (2003) veronderstellen dat wanneer men ergens een pyrolyse- of vergassingsinstallatie bouwt er 10% van de landbouwoppervlakte rond die installatie aangewend wordt voor de teelt van energiegewassen. We kunnen dus stellen dat 4,5% (10% * 45%) van het aanvoergebied rond de pyrolyse- of vergassingsinstallatie bestemd is voor het telen van energiegewassen. Formule (9) wordt nu:

$$\text{Oppervlakte aanvoergebied} = \text{oppervlakte energiegewas} / (0,045) \quad (10)$$

De toepassing van deze formule levert onderstaande tabellen op:

Oppervlakte energiegewas wilg (ha)	Oppervlakte energiegewas populier (ha)	Oppervlakte aanvoergebied wilg (ha)	Oppervlakte aanvoergebied populier (ha)
2 025	2 235	45 000	49 667
3 739	4 126	83 089	91 689
7 114	7 850	158 089	174 444
10 174	11 227	226 089	249 489
13 258	14 629	294 622	325 089
16 204	17 880	360 089	397 333

Tabel 14: berekening oppervlakte aanvoergebied bij vergassing

Oppervlakte energiegewas wilg (ha)	Oppervlakte energiegewas populier (ha)	Oppervlakte aanvoergebied wilg (ha)	Oppervlakte aanvoergebied populier (ha)
2 778	3 065	61 733	68 111
5 556	6 130	123 467	136 222
11 111	12 261	246 911	272 467
16 667	18 391	370 378	408 689
22 222	24 521	493 822	544 911
29 167	30 651	648 156	681 133

Tabel 15: berekening oppervlakte aanvoergebied bij pyrolyse

We werken in het verdere verloop van onze studie met gegevens over wilg. De netto energieopbrengst per hectare van wilg ligt immers hoger dan die van populier.

Het aanvoergebied rondom de installatie neemt de vorm van een cirkel aan. De actieradius wordt gezien als de straal van deze cirkel en wordt als volgt berekend:

$$r = (\text{oppervlakte aanvoergebied} / \pi)^{0,5} \quad (11)$$

Het korte omloophout wordt eerst opgehaald en daarna afgeleverd aan de pyrolyse- of vergassingsinstallatie. Er is dus sprake van een heen- en terugrit. In deze studie wordt verondersteld dat de locatie waar het korte omloophout wordt opgehaald gelegen is op de helft van de straal. Hierdoor stellen we de actieradius gelijk aan $r/2$ en de vervoerafstand per lading gelijk aan r . In onderstaande tabellen wordt de vervoersafstand per lading wilg berekend voor zowel vergassing als pyrolyse.

Oppervlakte aanvoergebied wilg (ha)	Actieradius wilg (km)	Vervoersafstand per lading wilg (km)
45 000	5,99	11,97
83 089	8,13	16,26
158 089	11,22	22,43
226 089	13,42	26,83
294 622	15,31	30,62
360 089	16,93	33,85

Tabel 16: vervoersafstand per lading wilg bij vergassing

Oppervlakte aanvoergebied wilg (ha)	Actieradius wilg (km)	Vervoersafstand per lading wilg (km)
61 733	7,01	14,02
123 467	9,91	19,82
246 911	14,02	28,03
370 378	17,17	34,34
493 822	19,83	39,65
648 156	22,71	45,42

Tabel 17: vervoersafstand per lading wilg bij pyrolyse

Caputo *et al.* (2003) gebruiken een energieconsumptie van 0,8 MJ per ton per kilometer. Dit cijfer werd voorgesteld door Biewinga en Van der Bijl (1996). Tabellen 18 en 19 geven de energieconsumptie tijdens het transport van wilg weer bij zowel vergassing als pyrolyse.

Netto elektrische output W_{NE} (MW_e)	Vervoersafstand per lading wilg (km)	Opbrengst per hectare wilg (tds/ ha)	Energieconsumptie wilg tijdens transport (GJ/ ha)
5	11,97	9,6	0,09
10	16,26	9,6	0,12
20	22,43	9,6	0,18
30	26,83	9,6	0,21
40	30,62	9,6	0,24
50	33,85	9,6	0,26

Tabel 18: energieconsumptie wilg tijdens transport bij vergassing

Netto elektrische output W_{NE} (MW_e)	Vervoersafstand per lading wilg (km)	Opbrengst per hectare wilg (tds/ ha)	Energieconsumptie wilg tijdens transport (GJ/ ha)
5	14,02	9,6	0,11
10	19,82	9,6	0,15

20	28,03	9,6	0,22
30	34,34	9,6	0,26
40	39,65	9,6	0,30
50	45,42	9,6	0,35

Tabel 19: energieconsumptie wilg tijdens transport bij pyrolyse

De laatste kolom van tabellen 18 en 19 wordt berekend door de vervoersafstand per lading wilg te vermenigvuldigen met de opbrengst wilg per hectare. Aangezien de energieconsumptie 0,8 MJ per ton per kilometer is wordt dit alles nog eens vermenigvuldigd met 0,0008.

6.2.3 Netto energieopbrengst

Om tot de netto energieopbrengst per hectare te komen trekken we van de energieopbrengst na teelt en oogst de energieconsumptie tijdens het transport af. Dit gebeurt zowel voor vergassing als voor pyrolyse.

Netto elektrische output W_{NE} (MW_e)	Energieopbrengst wilg na teelt en oogst per hectare (GJ/ ha)	Energieconsumptie wilg tijdens transport (GJ/ ha)	Netto energieopbrengst wilg per hectare (GJ/ ha)
5	160,67	0,09	160,58
10	160,67	0,12	160,55
20	160,67	0,18	160,49
30	160,67	0,21	160,46
40	160,67	0,24	160,43
50	160,67	0,26	160,41

Tabel 20: netto energieopbrengst wilg bij vergassing

Netto elektrische output W_{NE} (MW_e)	Energieopbrengst wilg na teelt en oogst per hectare (GJ/ ha)	Energieconsumptie wilg tijdens transport (GJ/ ha)	Netto energieopbrengst wilg per hectare (GJ/ ha)
5	160,67	0,11	160,56
10	160,67	0,15	160,52
20	160,67	0,22	160,45
30	160,67	0,26	160,41
40	160,67	0,30	160,37
50	160,67	0,35	160,32

Tabel 21: netto energieopbrengst wilg bij pyrolyse

Hoofdstuk 7: Vergassing en pyrolyse met elektriciteitsopwekking

7.1 De initiële investering

7.1.1 Totale investeringskosten van vergassing

Caputo *et al.* (2005) hebben een gedetailleerde indeling gemaakt van de investeringskosten van een wervelbedvergasser gevolgd door een stoom- en gasturbine (STEG). De totale investeringskosten worden opgedeeld in directe kosten en indirecte kosten. De directe kosten bestaan uit de totale uitrustingskosten, de pijpleidingkosten, de elektriciteitskosten en de civiele werkkost. Deze kosten variëren volgens de uitdrukking aS^b waarbij a en b specifieke coëfficiënten zijn en S een karakteristieke parameter is. De waarden van de coëfficiënten a en b zijn betrouwbaar aangezien ze vergeleken zijn met actuele kostendata, die men verkreeg bij verkopers. De parameters die relevant zijn bij de berekening van de totale investeringskosten van vergassing zijn W_{ST} , W_{NE} , W_{GT} , $M_{G/CC}$ en M_{HRSG} . Verder maken de directe installatiekosten, instrumentatie en controle, hulpdiensten en terreinvoorbereiding ook deel uit van de directe kosten. Zij variëren allen met de eerder vernoemde totale uitrustingskosten. De indirecte kosten zijn de constructie- en opstartkosten en ook zij zijn afhankelijk van de totale uitrustingskosten. Voor een schematische voorstelling van deze indeling verwijzen we naar bijlage 1.

Tijdens de berekening van bepaalde kostencomponenten was het nodig om een aantal assumpties te maken omtrent de voor ons onbekende parameters. De netto elektriciteitsoutput W_{NE} is de som van de netto elektriciteitsoutput van de stoomcyclus W_{ST} en de netto elektriciteitsoutput van de gasturbine W_{GT} . We kunnen dit ook herschrijven als volgt:

$$W_{ST} + W_{GT} = W_{NE} \tag{12}$$

60% tot 70% van de totale netto elektriciteitsoutput is afkomstig van de gasturbine en dus wordt 30% tot 40% van de totale elektriciteit geproduceerd door de stoomturbine. (Cogeneration Technologies, 1999)

Onderstaande tabel geeft voor drie verschillende Belgische centrales de fractie van de totale elektriciteit weer die respectievelijk door de stoomturbine en de gasturbine wordt opgewekt.

Ligging installatie	$\frac{W_{ST}}{W_{NE}}$	$\frac{W_{GT}}{W_{NE}}$
Centrale van Seraing	0,37	0,63
Centrale van Gent Ringvaart	0,34	0,66
Centrale van Gent Ham	0,22	0,78

Tabel 22: fractie van totale elektriciteit opgewekt door respectievelijk de stoomturbine en gasturbine

Bron: Het Milieueffectenrapport

Op basis van deze gegevens gaan we er in deze studie van uit dat 70% van de totale netto elektriciteitsoutput afkomstig is van de gasturbine en dat de overige 30% wordt geproduceerd in de stoomturbine. Indien de totale netto elektriciteitsoutput 5 MW_e is, is 3,5 MW_e hiervan afkomstig uit de gasturbine en 1,5 MW_e uit de stoomturbine.

Een andere parameter die een invloed uitoefent op de totale investeringskosten is de flow ratio M_{G/CC} van de biomassa die aan de vergasser wordt gevoed. In onderstaande tabel wordt deze omgerekend in kilogram per uur. Bij deze berekening worden er 7 000 werkuren per jaar verondersteld.

Netto elektrische output W _{NE} (MW _e)	Aantal ton droge stof biomassa M (tds/ jaar)	M _{G/CC} (kg/ u)
5	19 444	2 778
10	35 897	5 128
20	68 292	9 756
30	97 674	13 953
40	127 273	18 605
50	155 556	22 222

Tabel 23: berekening flow ratio van de biomassa die aan de vergasser wordt gevoed

De laatste onbekende parameter is de flow ratio van het stoom dat geproduceerd wordt door de warmterecupererende stoomgenerator M_{HRSG} . Helaas zijn we er niet in geslaagd om de waarde van deze parameter te identificeren, ondanks contact met professor Caputo en William Morrow. Hierdoor was het onmogelijk om de kost van de warmtewinnende stoomgenerator, die varieert met deze parameter, te berekenen. Een benaderende waarde voor deze kost werd vermeld door het California Biomass Collaborative. Volgens deze bron is de kost van de warmterecupererende stoomgenerator 100 dollar per kW geproduceerde elektriciteit. Bij de wisselkoers van maart 2009 (1 EUR = 1,29 DOLLAR) komt dit overeen met ongeveer 78 EUR per kW geproduceerde elektriciteit. De kost van de warmterecupererende stoomgenerator is dus gelijk aan $78\ 000\ \text{EUR} * W_{NE}$.

De eigen berekeningen van de totale investeringskosten aan de hand van Caputo *et al.* (2005) worden weergegeven in de tweede kolom van tabel 26.

Bridgwater *et al.* (2002) geven een andere interessante indeling van de totale investeringskosten van vergassing weer. Er zijn een aantal gelijkenissen te vinden met de indeling die Caputo *et al.* (2005) maakten. Zo bestaan de directe kosten net zoals bij Caputo *et al.* (2005) uit pijpleidingkosten, elektriciteitskosten, instrumentatiekosten en civiele werkkosten. Bij Bridgwater *et al.* (2002) is er binnen de categorie van de directe kosten verder nog sprake van isolatiekosten en kosten voor structuren en gebouwen. Het optellen van deze directe kosten bij de engineeringkosten, de ontwerpkosten, de supervisiekosten en de overheadkosten levert de geïnstalleerde kosten op. Om tot de totale investeringskosten te komen tellen we bij dit geheel de commissielonen, de lonen van de bouwondernemer en de intresten op.

Diezelfde Bridgwater *et al.* (2002) ontwikkelden een aantal formules waarmee men de totale investeringskosten van een vergassingsinstallatie kan berekenen.

Er bestaan zowel formules voor atmosferische vergassers als voor pneumatische vergassers. Zoals eerder vermeld worden de vastbedvergassers en de wervelbedvergassers meestal atmosferisch met lucht bedreven. De entrained-flowvergassers werken dan weer pneumatisch. (Hemmes *et al.*, 2005) Om de vergelijkbaarheid met de berekeningen, die in het begin van deze paragraaf werden gemaakt op basis van gegevens van Caputo *et al.* (2005) te bevorderen, opteren we hier voor de formules van de atmosferische vergassers omdat hiertoe de wervelbedvergassers

behoren. Om tot de totale investeringskosten van de vergassingsinstallatie te komen dient men bij de investeringskosten van de atmosferische vergasser de investeringskosten van de STEG-centrale op te tellen. Dit gebeurt als volgt:

$$\text{Totale investeringskosten (EUR) atmosferische vergasser} = 1\,000 * [30,82 * (Q_{\text{dry}} * 1\,000)^{0,6983} * (190)/(140)] \quad (13)$$

met:

- Q_{dry} : flow ratio van aangevoerde biomassa (tds/ uur)

Q_{dry} wordt afgeleid uit tabel 10 in de veronderstelling dat er 7 000 werkuren per jaar zijn.

Vermogen vergassingsinstallatie (MW_e)	Q_{dry} (tds/ uur)	Totale investeringskosten atmosferische vergasser (EUR)
5	2,78	10 627 587
10	5,13	16 601 710
20	9,756	25 536 813
30	13,95	32 780 409
40	18,18	39 439 609
50	22,22	45 372 172

Tabel 24: totale investeringskosten atmosferische vergasser

$$\text{Totale investeringskosten (EUR) STEG-centrale} = 1000 * [2157 * (P_{e,\text{Gross}})^{0,85}] \quad (14)$$

met:

- $P_{e,\text{Gross}}$: elektriciteitsoutput van de STEG-centrale (MW_e)

Vermogen vergassingsinstallatie (MW_e)	$P_{e,\text{Gross}}$	Totale investeringskosten STEG-centrale (EUR)
5	5	8 471 780
10	10	15 270 391
20	20	27 524 893
30	30	38 851 090
40	40	49 613 645
50	50	59 975 607

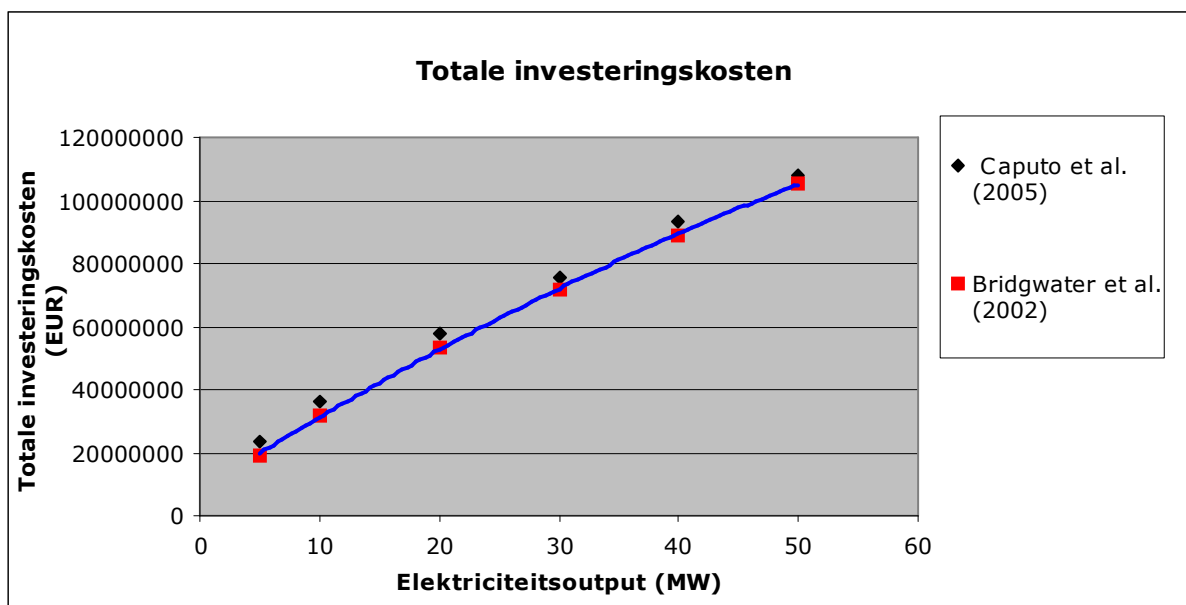
Tabel 25: totale investeringskosten STEG-centrale

De eigen berekeningen van de totale investeringskosten aan de hand van Bridgwater *et al.* (2002) worden weergegeven in de derde kolom van onderstaande tabel.

Elektriciteitsoutput (MW _e)	Eigen berekeningen (EUR) adhv Caputo <i>et al.</i> (2005)	Eigen berekeningen (EUR) adhv Bridgwater <i>et al.</i> (2002)
5	23 296 607	19 099 367
10	36 142 242	31 872 101
20	57 521 342	53 061 706
30	75 656 627	71 631 499
40	93 191 712	89 053 254
50	108 181 714	105 347 779

Tabel 26: totale investeringskosten vergassing

Onderstaande figuur geeft de totale investeringskosten weer in functie van de elektriciteitsoutput.

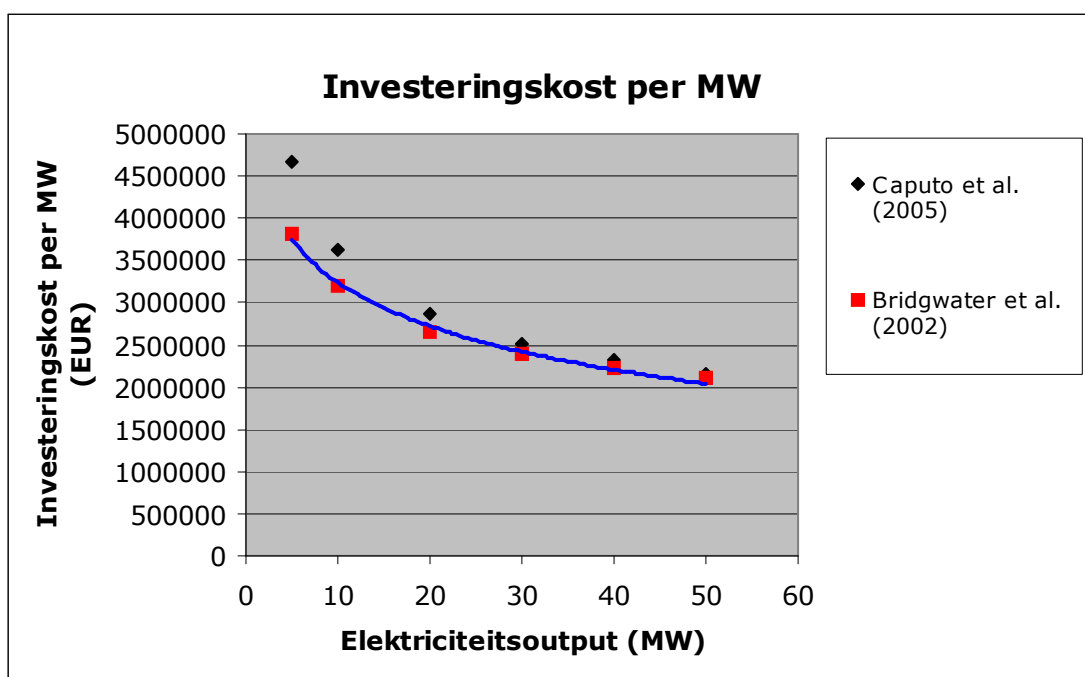


Figuur 8: totale investeringskosten in functie van elektriciteitsoutput bij vergassing

Uit de gegevens in tabel 26 stellen we vast dat een verdubbeling van de elektriciteitsoutput leidt tot minder dan een verdubbeling van de totale investeringskosten. We vermoeden dus dat er zich schaalvoordelen voordoen. Dit wordt bevestigd door onderstaande tabel en figuur. De investeringskosten per megawatt nemen immers af naarmate de elektriciteitsoutput stijgt.

Elektriciteitsoutput (MW _e)	Investeringskosten per MW _e adhv Caputo <i>et al.</i> (2005)	Investeringskosten per MW _e adhv Bridgwater <i>et al.</i> (2002)
5	4 659 321	3 819 873
10	3 614 224	3 187 210
20	2 876 067	2 653 085
30	2 521 961	2 387 717
40	2 329 793	2 226 331
50	2 163 634	2 106 956

Tabel 27: investeringskosten per MW_e bij vergassing



Figuur 9: investeringskost per MW_e in functie van elektriciteitsoutput bij vergassing

Uit deze figuur stellen we vast dat voor de grote capaciteiten er weinig verschil is tussen de berekeningen op basis van Caputo *et al.* (2005) en Bridgwater *et al.* (2002). Bij lagere capaciteiten is er sprake van een vrij groot verschil. We verkiezen om verder te werken met de berekeningen aan de hand van de indeling van Caputo *et al.* (2005), aangezien het met deze indeling mogelijk is na te gaan hoe groot de kosten van de verschillende componenten van de investering zijn.

Onderstaande tabel geeft het aandeel van de kostencomponenten weer ten opzichte van de totale investeringskosten voor verschillende capaciteiten.

Vermogen vergassingsinstallatie (MW _e)	5	10	20	30	40	50
Totaal directe kosten	91,10%	90,86%	90,61%	90,72%	90,39%	90,33%
- totale uitrustingskosten	40,48%	41,56%	42,68%	42,17%	43,73%	43,96%
- pijpleidingkosten	3,23%	3,19%	3,15%	3,48%	3,12%	3,14%
- elektriciteitskosten	8,52%	8,51%	8,34%	9,09%	8,05%	8,01%
- civiele werkkost	12,57%	10,58%	8,71%	8,57%	7,06%	6,65%
- directe installatiekosten	12,14%	12,47%	12,8%	12,65%	13,12%	13,19%
- hulpdiensten	6,07%	6,23%	6,40%	6,33%	6,56%	6,59%
- instrumentatie en controle	4,05%	4,16%	4,27%	4,22%	4,37%	4,40%
- terreinvoorbereiding	4,05%	4,16%	4,27%	4,22%	4,37%	4,40%
Totaal indirecte kosten	8,90%	9,14%	9,39%	9,28%	9,62%	9,67%
- constructiekosten	4,86%	4,99%	5,12%	5,06%	5,25%	5,27%
- opstartkosten	4,05%	4,16%	4,27%	4,22%	4,37%	4,40%
Totaal	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Tabel 28: gewicht investeringscomponenten

7.1.2 Totale investeringskosten van pyrolyse

Putsche *et al.* (2006) hebben een indeling opgesteld van de totale investeringskosten van een pyrolyse-installatie. De totale investeringskosten bestaan uit de totale installatiekosten en drie categorieën indirecte kosten, die elk variëren met de totale installatiekosten. De totale installatiekosten bestaan uit de totale uitrustingskosten, de opslagkosten en de terreinontwikkelingskosten. De samenstelling van de totale uitrustingskosten is terug te vinden in onderstaande tabel.

Totale uitrustingskosten
- behandeling en droging biomassa
- pyrolyse
- uitblussen
- warmtewinning
- productrecuperatie en opslag
- hergebruik
- stoom- en elektriciteitsproductie
- nutsvoorzieningen
- contingency

Tabel 29: indeling totale uitrustingskosten

Bron: Putsche *et al.* (2006)

De opslagkosten variëren met deze totale uitrustingskosten. Om tot de totale kost van het investeringsproject te komen telt men de opstartkosten, 10% van totale

investeringskosten, op bij de totale investeringskosten. Helaas is het onmogelijk om met behulp van deze indeling de totale investeringskosten van een pyrolyse-installatie te berekenen voor de capaciteitsrange die wij bestuderen. Putsche *et al.* (2006) hebben wel een voorbeeld uitgewerkt waarin de investeringskost van een installatie met een elektriciteitsoutput van 4,9 MW_e wordt berekend. De totale kost van deze investering bedraagt ongeveer 20 miljoen EUR.

Tijdens onze berekeningen zijn de totale investeringskosten van pyrolyse de som van de investeringskosten van het eigenlijke pyrolyseproces, de opslagkosten van de pyrolyse-olie en de investeringskosten van de dieselmotor, waarin de pyrolyse-olie wordt omgezet in elektriciteit.

De investeringskosten van het eigenlijke pyrolyseproces en de opslagkosten van de pyrolyse-olie worden berekend met behulp van formules (15) en (16). (Bridgwater *et al.*, 2002)

$$\text{Totale investeringskosten (EUR) van het eigenlijke pyrolyseproces} = 40,8 * 10^3 * (Q_{\text{dry}} * 1\ 000)^{0,6194} \quad (15)$$

met:

- Q_{dry} = flow ratio van aangevoerde biomassa (tds/ uur)

Q_{dry} wordt afgeleid uit tabel 11 in de veronderstelling dat er 7 000 werkuren per jaar zijn.

Vermogen pyrolyse-installatie (MW _e)	Q_{dry} (tds/ uur)	Totale investeringskosten eigenlijke pyrolyseproces (EUR)
5	3,81	6 740 391
10	7,62	10 354 832
20	15,24	15 907 468
30	22,86	20 448 995
40	30,48	24 437 627
50	38,10	28 059 834

Tabel 30: totale investeringskosten eigenlijke pyrolyseproces

$$\text{Totale opslagkosten (EUR) pyrolyse-olie} = 119 * 10^3 * (Q_{\text{conv}})^{0,4045} \quad (16)$$

met:

- Q_{conv} = flow ratio van het vloeibaar conversieproduct van pyrolyse (ton/ uur)
- $Q_{\text{conv}} = 0,7x Q_{\text{dry}}$

Vermogen pyrolyse-installatie (MW _e)	Q _{conv} (ton/ uur)	Totale opslagkosten pyrolyse-olie (EUR)
5	2,67	177 040
10	5,33	234 158
20	10,67	310 056
30	16,00	365 270
40	21,34	410 399
50	26,67	449 131

Tabel 31: totale opslagkosten pyrolyse-olie

De investeringskost van de dieselmotor wordt berekend op basis van formule (17), die terug te vinden is bij Thewys en Kuppens (2008).

$$\text{Totale investeringskosten (EUR) dieselmotor} = 1\,126,2 * 10^3 * [(\alpha_e * 17\,500 * 0,7 * Q_{\text{dry}}) / 3\,600]^{0,7813} \quad (17)$$

Hierbij is α_e het percentage van de energie-inhoud van de pyrolyse-olie dat wordt omgezet in elektriciteit. Net zoals in paragraaf 6.2.2.2 wordt er voor de dieselmotor een elektrische efficiëntie van 45% gebruikt.

Vermogen pyrolyse-installatie (MW _e)	Q _{dry} (tds/ uur)	Totale investeringskosten dieselmotor (EUR)
5	3,81	4 566 963
10	7,62	7 849 143
20	15,24	13 490 156
30	22,86	18 518 128
40	30,48	23 185 246
50	38,10	27 601 171

Tabel 32: totale investeringskosten dieselmotor

Volgens van Tilburg *et al.* (2005) ligt de investeringskost van een dieselmotor binnen een range van 800 000 tot 1 000 000 EUR/ MW_e. Ter vergelijking met deze waarden worden in onderstaande tabel de investeringskosten per MW_e op basis van eigen berekeningen bepaald.

Vermogen pyrolyse-installatie (MW _e)	Investeringskosten dieselmotor per MW _e (EUR)
5	913 393
10	784 914
20	674 508
30	617 271
40	579 631
50	552 023

Tabel 33: totale investeringskosten dieselmotor per MW_e

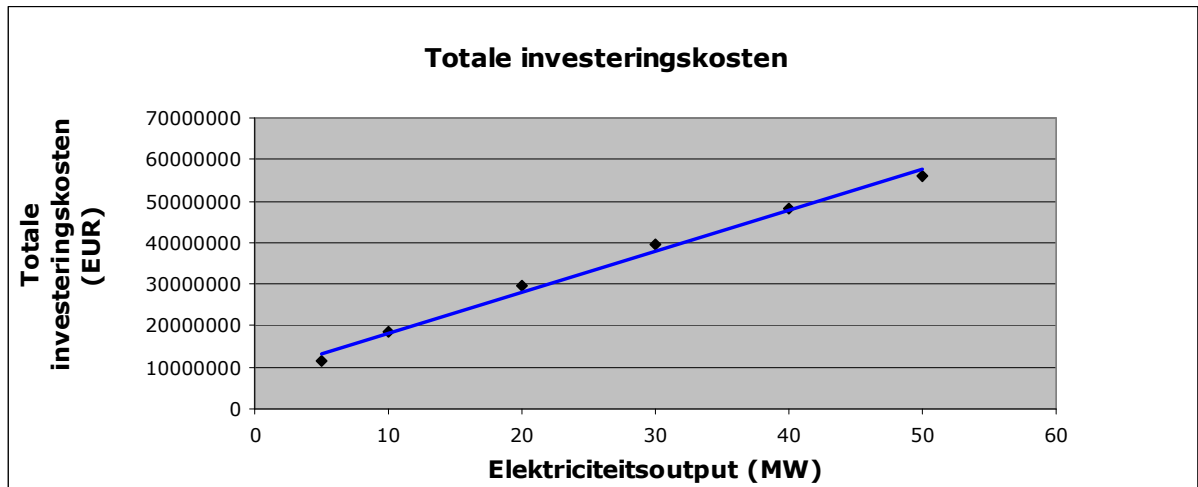
We stellen vast dat de investeringskosten van de dieselmotor per megawatt enkel bij een vermogen van 5 MW_e binnen de range van van Tilburg *et al.* (2005) liggen. Bij hogere vermogens ligt de investeringskost van de dieselmotor per megawatt lager dan 800 000 EUR. In onderstaande tabel worden de totale investeringskosten van pyrolyse berekend.

Vermogen pyrolyse-installatie (MW _e)	Totale investeringskosten eigenlijke pyrolyseproces (EUR)	Totale opslagkosten pyrolyse-olie (EUR)	Totale investeringskosten dieselmotor (EUR)	Totale investeringskosten pyrolyse (EUR)
5	6 740 391	177 040	4 566 963	11 484 394
10	10 354 832	234 158	7 849 143	18 438 133
20	15 907 468	310 056	13 490 156	29 707 680
30	20 448 995	365 270	18 518 128	39 332 393
40	24 437 627	410 399	23 185 246	48 033 272
50	28 059 834	449 131	27 601 171	56 110 136

Tabel 34: totale investeringskosten pyrolyse

Deze totale investeringskosten zijn laag in vergelijking met het voorbeeld dat Putsche *et al.* (2006) uitwerken. In hun voorbeeld bedroegen de totale investeringskosten voor een installatie van 4,9 MW_e ongeveer 20 000 000 EUR.

Figuur 10 geeft de totale investeringskosten van pyrolyse weer in functie van de elektriciteitsoutput.

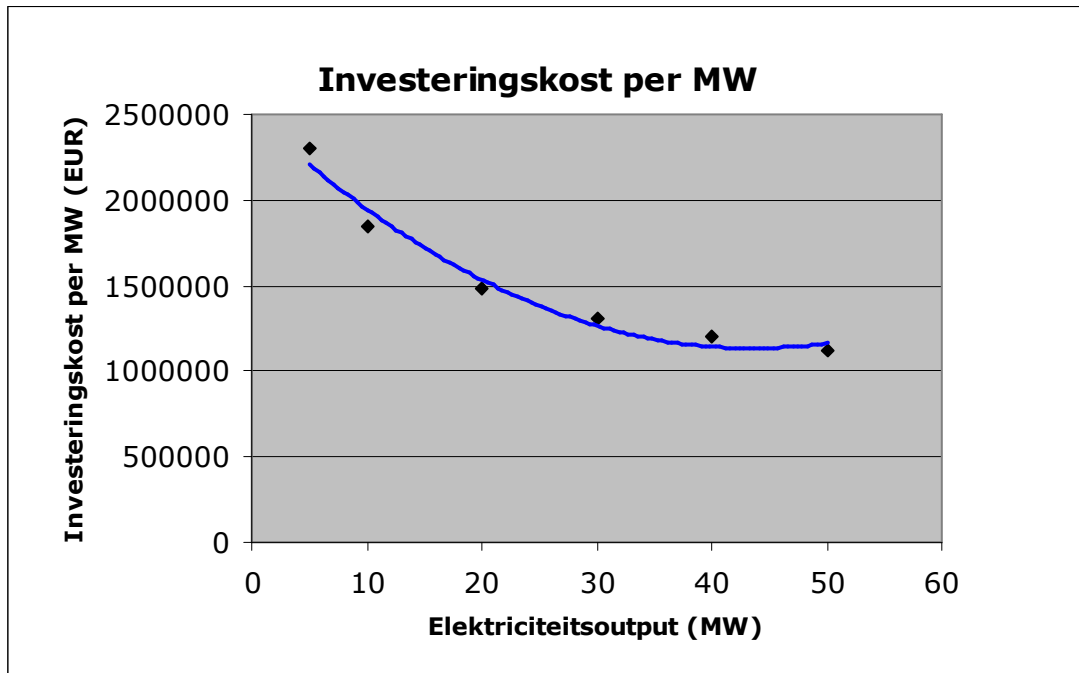


Figuur 10: totale investeringskosten in functie van elektriciteitsoutput voor pyrolyse

Net zoals bij vergassing stellen we vast dat een verdubbeling van de elektriciteitsoutput leidt tot minder dan een verdubbeling van de totale investeringskosten. We vermoeden dus dat er zich schaalvoordelen voordoen. Dit wordt bevestigd door onderstaande tabel en figuur. De investeringskosten per megawatt nemen immers af naarmate de elektriciteitsoutput stijgt.

Elektriciteitsoutput (MW _e)	Investeringskosten per MW _e
5	2 296 879
10	1 843 813
20	1 485 384
30	1 311 080
40	1 200 832
50	1 122 203

Tabel 35: investeringskosten per MW_e bij pyrolyse



Figuur 11: investeringskost per MW_e in functie van elektriciteitsoutput bij pyrolyse

7.1.3 Ecologiepremie

Zoals in paragraaf 4.8 vermeld werd, wordt sinds kort de ecologiepremie-call toegepast. Drie keer per jaar worden er oproepen georganiseerd, waarop ondernemingen hun investeringsproject kunnen inschrijven. Elke onderneming kan slechts één aanvraag indienen per oproep. Investeringsprojecten die in aanmerking komen voor de premie worden objectief beoordeeld en gerangschikt op basis van gunstigheid. Bij de verdeling van het voor de oproep beschikbare subsidiebedrag baseert men zich op deze rangschikking. (Agentschap Economie, 2008)

De ecologiepremie verschilt naargelang de grootte van de onderneming: ze bedraagt 40% voor kleine- en middelgrote ondernemingen en 20% voor grote ondernemingen. Per aanvraag kan het bedrag oplopen tot maximum 1 750 000 EUR. In het totaal wordt er per oproep 40 miljoen EUR verdeeld onder de meest gunstige investeringsprojecten. (Zeebroek, 2009)

In paragraaf 4.8 stelden we vast dat om de grootte van de subsidie te berekenen enkel de extra investeringen die noodzakelijk zijn voor het verwezenlijken van milieudoelinden in aanmerking komen. (Kinable en Zeebroek, 2007) Dit zijn de zogenaamde essentiële investeringscomponenten. (Agentschap Economie, 2008)

7.1.3.1 Essentiële investeringscomponenten vergassing

Voor de productie van energie (WKK/ elektriciteit) op basis van de vergassing van biomassa zijn de initiële investeringscomponenten:

- elektrotechnische uitrusting voor aansluiting op interne en/ of externe elektriciteitsnetten
- meet- en regelapparatuur
- installatie voor afhandeling van reststoffen
- installatie van krachtwerktuigen (turbines, diesel- of Stirling- of stoom- of gasmotoren of ORC)
- vergassingsapparatuur en aangepaste branders of vuurhaarden, voorzien van luchtvoorverwarmers en rookgasrecirculatie (Agentschap Economie, 2008)

Een aantal investeringscomponenten uit de indeling van Caputo *et al.* (2005) zijn essentieel en komen dus in aanmerking voor een ecologiepremie. Deze componenten zijn weergegeven in onderstaande tabel. De totale ecologiepremie zou hier 2 174 277 EUR bedragen, maar de maximumpremie bedraagt slechts 1 750 000 EUR.

Essentiële investerings-componenten	Kostprijs (EUR)	Subsidie-percentage	Meerkost-percentage	Ecologie-premie (EUR)
Opwekken van elektriciteit	6 048 841	40%	50%	1 209 768
Rookbehandeling	1 144 070	40%	50%	228 814
Pijpleidingkosten	751 360	40%	50%	150 272
Elektriciteitskosten	1 984 143	40%	50%	396 829
Instrumentatie en controle	942 972	40%	50%	188 594
Totale ecologiepremie (EUR)				2 174 277 → 1 750 000

Tabel 36: berekening ecologiepremie voor vergassingsinstallatie 5 MW_e

Het meerkostpercentage is het gedeelte van het essentiële investeringsbedrag dat in aanmerking komt voor de ecologiepremie. Voor de vergassing van biomassa geldt een meerkostpercentage van 50%. (Agentschap Economie, 2008)

In tabel 36 gebeurt de berekening van de ecologiepremie voor een vergassingsinstallatie met een vermogen van 5 MW_e. In tabel 37 wordt deze premie ook berekend voor installaties met een vermogen van 10 tot 50 MW_e.

Vermogen vergassingsinstallatie (MW_e)	Totale kostprijs essentiële investeringscomponenten (EUR)	Ecologiepremie (EUR)
5	10 871 386	1 750 000
10	17 345 151	1 750 000
20	28 300 114	1 750 000
30	34 533 314	1 750 000
40	46 871 328	1 750 000
50	54 803 710	1 750 000

Tabel 37: ecologiepremie vergassing

Uit deze tabel leiden we af dat voor de volledige vermogensrange de maximumpremie van 1 750 000 EUR per investeringsproject wordt bereikt.

7.1.3.2 Essentiële investeringscomponenten pyrolyse

Voor de productie van energie (WKK/ elektriciteit) op basis van de pyrolyse van biomassa zijn de initiële investeringscomponenten:

- elektrotechnische uitrusting voor aansluiting op interne en/ of externe elektriciteitsnetten
- installatie voor afhandeling van reststoffen
- installatie voor krachtwerktuigen (turbines, diesel- of Stirling- of stoom- of gasmotoren of ORC)
- schoorstenen en apparatuur om rookgas/ stookgas te reinigen, met inbegrip van apparatuur voor injectie van additieven en apparatuur voor afvoer en opslag van vliegassen
- pyrolyseapparatuur en aangepaste branders of vuurhaarden, voorzien van luchtvoorverwarmers en rookgasrecirculatie
- meet- en regelapparatuur (Agentschap Economie, 2008)

Wanneer we deze essentiële investeringscomponenten vergelijken met tabel 29 besluiten we dat volgende componenten in aanmerking komen voor de ecologiepremie:

- pyrolyse
- uitblussen
- productrecuperatie en opslag
- hergebruik
- stoom- en elektriciteitsproductie

Bij Putsche *et al.* (2006) is een voorbeeld terug te vinden, waarin deze componenten berekend zijn voor een installatie met een elektrisch vermogen van 4,9 MW_e. Hieruit blijkt dat 23,19% van de totale investeringskosten in aanmerking komen voor de ecologiepremie. In bijlage 2 wordt weergegeven hoe men tot dit percentage komt.

Deze waarde dient echter met de nodige voorzichtigheid te worden geïnterpreteerd, aangezien het hier om een zeer ruwe schatting gaat. We geven dus de voorkeur aan een andere benadering.

Aangezien we niet beschikken over voldoende informatie over de grootte van de verschillende kostencomponenten van de totale investeringskosten van pyrolyse, trachten we de grootte van de ecologiepremie te benaderen door een vergelijking te maken met de conversietechnieken verbranding en vergassing. In onderstaande tabel wordt weergegeven welk percentage van de totale investeringskosten deel uitmaakt van de essentiële investeringscomponenten en dus in aanmerking komt voor de ecologiepremie. Hiervoor maken we voor verbranding gebruik van de gegevens van Ceunen (2008) en voor vergassing van onze eigen gegevens.

Vermogen installatie (MW_e)	Percentage essentiële investeringscomponenten tov totale investeringskosten verbranding (Ceunen, 2008)	Percentage essentiële investeringscomponenten tov totale investeringskosten vergassing
5	53,36	46,67
10	54,31	47,99
20	55,13	49,20
30	/	50,39
40	/	50,30
50	55,97	50,66

Tabel 38: essentiële investeringscomponenten verbranding en vergassing bij ecologiepremie

We kiezen ervoor om bij pyrolyse een percentage te gebruiken dat het gemiddelde is van het percentage van verbranding en vergassing. Dit percentage wordt weergegeven in tabel 39. Voor een vermogen van 30 en 40 MW_e hebben we geen gegevens ter beschikking voor verbranding. Voor deze vermogens hebben we een percentage geschat op basis van de percentages van de andere vermogens.

Vermogen installatie (MW_e)	Percentage essentiële investeringscomponenten tov totale investeringskosten pyrolyse
5	50,02
10	51,15
20	52,17
30	52,55
40	52,94
50	53,32

Tabel 39: essentiële investeringscomponenten pyrolyse bij ecologiepremie

Ook voor de pyrolyse van biomassa geldt een meerkostpercentage van 50%. (Agentschap Economie, 2008) In tabel 40 wordt de ecologiepremie berekend voor de verschillende vermogens van de pyrolyse-installatie.

Vermogen pyrolyse-installatie (MW_e)	Totale kostprijs essentiële investeringscomponenten (EUR)	Ecologiepremie (EUR)
5	5 744 494	1 148 899
10	9 431 105	1 750 000
20	15 498 497	1 750 000
30	20 669 173	1 750 000
40	25 428 814	1 750 000
50	29 917 925	1 750 000

Tabel 40: ecologiepremie pyrolyse

Uit deze tabel stellen we vast dat vanaf een vermogen van 10 MW_e de maximumpremie van 1 750 000 EUR per investeringsproject wordt bereikt.

7.1.3.3 Performantiefactor

Elke technologie die deel uitmaakt van de limitatieve technologieënlijst krijgt een performantiecijfer tussen 0 en 1. Deze factor is een kwalitatieve beoordeling die aanduidt in welke mate de desbetreffende technologie een bijdrage levert aan het behalen van de Kyoto-doelstellingen of de milieudoelstellingen van de Vlaamse overheid. (Agentschap Economie, 2008) De performantiefactor bekomt men door het product te nemen van de mate waarin de technologie bijdraagt tot de milieudoelstellingen en de implementatiegraad, dit wil zeggen de mate waarin een technologie al wordt toegepast in Vlaanderen. (Kinable)

Per oproep worden alle ingediende projecten gerangschikt volgens een bepaald scoresysteem op basis van diverse criteria. De performantiefactor is het belangrijkste criterium, het bepaalt 90% van de score. De drie andere criteria, die samen 10% van de score bepalen, hebben geen betrekking op de technologie maar op kenmerken van de onderneming die de ecologie-investering wilt doen. Deze drie bijkomende criteria zijn: cashflowratio, toetreding tot het Auditconvenant en het milieuzorgsysteem (het al dan niet hebben van een milieucertificaat). (FEDERAUTO)

De overheid heeft enkele scenario's voor de steunverdeling bekeken om een idee te krijgen over de slaagkansen van een ecologie-project. Op basis van aanvragen die al eerder werden gedaan zou de slaagkans van een investering in een milieuproject ongeveer gelijk zijn aan 67%. Hoe hoger de totaalscore die aan de technologie werd gegeven, hoe hoger zijn rangschikking, hoe hoger de slaagkans van het project. Op basis hiervan kan een bedrijf inschatten of zijn investering uiteindelijk kans maakt om gesubsidieerd te worden met een ecologiepremie. (Kinable)

De performantiefactor voor de productie van elektriciteit op basis van zowel de vergassing als de pyrolyse van biomassa is 46%. (Agentschap Economie, 2008) We mogen er dus niet zomaar van uitgaan dat voor de door ons bestudeerde technologieën een aanvraag altijd tot de ontvangst van een ecologiepremie leidt. Volgens Zeebroek (2009) is de slaagkans van de investering in een milieuproject voor het jaar 2009 echter 100%. In deze studie wordt er dan ook verondersteld dat elke investering in aanmerking komt voor de ecologiepremie.

7.1.4 Investeringsaftrek

Zoals vermeld in paragraaf 4.8 geldt er voor het aanslagjaar 2009 een verhoogde investeringsaftrek van 15,5% op de aanschaffingswaarde van een energiebesparende investering. (Zeebroek, 2009) Deze investeringsaftrek wordt afgetrokken van de winst van het belastbare tijdperk waarin de energiebesparende investering tot stand kwam of verkregen werd. (Claes *et al.*, 2005)

De vergassing en pyrolyse van biomassa vallen onder categorie 10: productie en gebruik van energie door chemische, thermo-chemische of biochemische omzetting van biomassa en afvalstoffen. In aanmerking komen, de investeringen binnen de inrichting in:

- uitrusting uitsluitend voor het bewerken, opslaan en transporteren van de in- en uitgaande stoffen
- reactoren gebruikt voor de chemische, thermo-chemische of biochemische omzetting van de biomassa en de afvalstoffen met inbegrip van verbrandingsapparaten en aangepaste branders of vuurhaarden
- recuperatiestookketels aangesloten op verbrandingsapparaten; ketels of het verbouwen ervan en krachtwerktuigen om de verkregen brandstof te gebruiken
- warmtewisselaars
- meet-, tel- en regelapparatuur
- schoorstenen en apparatuur om rookgas en gasvormige of vloeibare effluenten te reinigen (Claes *et al.* , 2005)

De berekening van de investeringsaftrek is mogelijk met onderstaande formule:

$$\text{Voordeel investeringsaftrek} = b * c * I \quad (18)$$

met:

- b: de belastingsvoet (33%)
- c: het investeringsaftrekpercentage (15,5%)
- I: de totale investeringskosten (Mercken, 2004)

Voor vergassing geldt dat in vergelijking met de ecologiepremie dezelfde investeringscomponenten in aanmerking komen voor de verhoogde investeringsaftrek,

met uitzondering van de biomassaopslag- en biomassabehandelingskosten. Deze laatste komen enkel in aanmerking voor de verhoogde investeringsaftrek en niet voor de ecologiepremie. In de lijst met de voor de investeringsaftrek in aanmerking komende investeringcomponenten vindt men immers "uitrusting uitsluitend voor het bewerken, opslaan en transporteren van de in- en uitgaande stoffen" terug.

Vermogen vergassingsinstallatie (MW_e)	In aanmerking komende investeringscomponenten (EUR)	Verhoogde investeringsaftrek (EUR)
5	13 108 194	670 484
10	20 751 871	1 061 458
20	33 608 948	1 719 098
30	44 593 895	2 280 978
40	55 231 002	2 825 066
50	64 372 906	3 292 674

Tabel 41: verhoogde investeringsaftrek vergassing

Voor pyrolyse dient men deze essentiële investeringscomponenten te vergelijken met tabel 29. Op basis hiervan kan men besluiten dat volgende componenten in aanmerking komen voor de verhoogde investeringsaftrek:

- behandeling en droging biomassa
- pyrolyse
- uitblussen
- productrecuperatie en opslag
- hergebruik
- stoom- en elektriciteitsproductie

Uit het voorbeeld van Putsche *et al.* (2006) voor een installatie van 4,9 MW_e blijkt dat 34,72% van de totale investeringskosten in aanmerking komen voor de verhoogde investeringsaftrek. De berekening van dit percentage wordt weergegeven in bijlage 2. Ook hier dient dit percentage met de nodige voorzichtigheid te worden geïnterpreteerd, aangezien het hier om een zeer ruwe schatting gaat. We geven dus opnieuw de voorkeur aan een andere benadering.

Omdat we niet beschikken over voldoende informatie over de grootte van de verschillende kostencomponenten van de totale investeringskosten van pyrolyse trachten

we de grootte van de verhoogde investeringsaftrek te benaderen door een vergelijking te maken met de conversietechnieken verbranding en vergassing. In onderstaande tabel wordt weergegeven welk percentage van de totale investeringskosten van verbranding of van vergassing deel uitmaakt van de essentiële investeringscomponenten en dus in aanmerking komt voor de verhoogde investeringsaftrek. Hiervoor maken we net zoals bij de ecologiepremie gebruik van de gegevens van Ceunen (2008) voor verbranding en voor vergassing van onze eigen gegevens.

Vermogen installatie (MW_e)	Percentage essentiële investeringscomponenten tov totale investeringskosten verbranding (Ceunen, 2008)	Percentage essentiële investeringscomponenten tov totale investeringskosten vergassing
5	56,04	56,27
10	57,23	57,42
20	58,35	58,43
30	/	58,95
40	/	59,27
50	59,70	59,50

Tabel 42: essentiële investeringscomponenten verbranding en vergassing bij verhoogde investeringsaftrek

We kiezen ervoor om bij pyrolyse een percentage te gebruiken dat het gemiddelde is van het percentage van verbranding en vergassing. Dit percentage wordt weergegeven in tabel 43. Voor een vermogen van 30 en 40 MW_e hebben we geen gegevens beschikbaar voor verbranding. Voor deze vermogens hebben we een percentage geschat op basis van de percentages voor de andere vermogens.

Vermogen installatie (MW_e)	Percentage essentiële investeringscomponenten tov totale investeringskosten pyrolyse
5	56,16
10	57,33
20	58,39
30	58,79
40	59,20
50	59,60

Tabel 43: essentiële investeringscomponenten pyrolyse bij verhoogde investeringsaftrek

In onderstaande tabel wordt de verhoogde investeringsaftrek berekend voor de verschillende vermogens van de pyrolyse-installatie. De belastingsvoet bedraagt ook hier 33% en het investeringsaftrekpercentage is 15,5%.

Vermogen pyrolyse-installatie (MW _e)	In aanmerking komende investeringscomponenten (EUR)	Verhoogde investeringsaftrek (EUR)
5	6 449 636	329 899
10	10 570 582	540 685
20	17 346 314	887 264
30	23 123 514	1 182 768
40	28 435 697	1 454 486
50	33 441 641	1 710 540

Tabel 44: verhoogde investeringsaftrek pyrolyse

7.1.5 De initiële investering van vergassing

Om de initiële investering voor vergassing te berekenen worden de ecologiepremie en de investeringsaftrek van de totale investeringskosten afgetrokken.

	5 MW _e	10 MW _e	20 MW _e	30 MW _e	40 MW _e	50 MW _e
Totale investeringskosten (EUR)	23 296 607	36 142 242	57 521 342	75 658 827	93 191 712	108 181 714
Ecologiepremie (EUR)	1 750 000	1 750 000	1 750 000	1 750 000	1 750 000	1 750 000
Investeringsaftrek (EUR)	670 484	1 061 458	1 719 098	2 280 978	2 825 066	3 292 674
Initiële investering (EUR)	20 876 123	33 330 784	54 052 244	71 627 849	88 616 646	103 139 040

Tabel 45: initiële investering vergassing

7.1.6 De initiële investering van pyrolyse

De berekening van de initiële investering van pyrolyse gebeurt op dezelfde manier als bij vergassing.

	5 MW_e	10 MW_e	20 MW_e	30 MW_e	40 MW_e	50 MW_e
Totale investeringskosten (EUR)	11 484 394	18 438 133	29 707 680	39 332 393	48 033 272	56 110 136
Ecologiepremie (EUR)	1 148 899	1 750 000	1 750 000	1 750 000	1 750 000	1 750 000
Investeringsaftrek (EUR)	329 899	540 685	887 264	1 182 768	1 454 486	1 710 540
Initiële investering (EUR)	10 005 596	16 147 448	27 070 416	36 399 625	44 828 786	52 649 596

Tabel 46: initiële investering pyrolyse

7.2 Operationele kosten vergassing

De operationele kosten van vergassing bestaan uit onderhoudskosten, personeelskosten, aanvoerkosten korte omloophout, verzekeringskosten, algemene overheadkosten, transport- en behandelingskosten van de assen en de energiekosten.

7.2.1 Onderhoudskosten

Caputo *et al.* (2005) en VITO hanteren een percentage van 3% voor de onderhoudskosten ten opzichte van de totale investeringskosten. Bridgwater *et al.* (2002) nemen een lager gemiddeld percentage van 2,5% aan. Bij de berekening van de onderhoudskosten wordt een percentage van 3% gebruikt.

Vermogen vergassingsinstallatie (MW_e)	Totale investeringskosten (EUR)	Onderhoudskosten (EUR)
5	23 296 607	698 898
10	36 142 242	1 084 267
20	57 521 342	1 725 640
30	75 658 827	2 269 765
40	93 191 712	2 795 751
50	108 181 714	3 245 451

Tabel 47: onderhoudskosten vergassing

7.2.2 Personeelskosten

Caputo *et al.* (2005) berekenen de personeelskosten met behulp van volgende formules:

$$\text{Operationele personeelskosten} = C_p * n \quad (19)$$

met:

- C_p : gemiddelde jaarloon per werknemer (EUR)
- n : totaal aantal werknemers

Men stelt het gemiddeld netto jaarloon per arbeider gelijk aan 26 000 EUR per jaar. (Caputo *et al.*, 2005) Bridgwater *et al.* (2002) veronderstellen een gemiddeld netto jaarloon per arbeider van 25 000 EUR. Van Stijn (2008) vermeldt een gemiddeld netto jaarloon per bediende van 60 000 EUR.

De jaarlijkse loonkost per werknemer is echter gelijk aan het brutoloon van de werknemer, dit is de som van het netto jaarloon, de RSZ-bijdrage en de bedrijfsvoorheffing. (Loonwijzer, 2009) Op basis van gegevens van Waterbley (2005) hanteren wij een jaarlijkse loonkost per werknemer van 52 000 EUR. Uit het gesprek met Marinus Van Stijn blijkt dat er in de Bio Oil Exploitation NV in drie shiften gewerkt wordt. In deze studie wordt er van uit gegaan dat er tijdens het vergassingsproces van korte omloophout ook in drie shiften gewerkt wordt.

In wat volgt wordt het totaal aantal werknemers n berekend voor een vergassingsinstallatie en de daaropvolgende STEG-centrale.

$$\text{Aantal werknemers bij vergassingsinstallatie per shift} = 1,04 * (Q_{\text{dry}})^{0,475} \quad (20)$$

met:

- Q_{dry} : flow ratio van aangevoerde biomassa (tds/ uur)

Vermogen vergassingsinstallatie (MW _e)	Q_{dry} (tds/ uur)	Aantal werknemers per shift bij vergassingsinstallatie (zonder afronding)	Aantal werknemers bij 3 shiften bij vergassingsinstallatie (zonder afronding)
5	2,78	1,69	5,07
10	5,13	2,26	6,78

20	9,76	3,07	9,21
30	13,95	3,64	10,92
40	18,18	4,12	12,36
50	22,22	4,54	13,62

Tabel 48: aantal werknemers vergassingsinstallatie

$$\text{Aantal werknemers bij STEG-centrale per shift} = [(-0,1951 * \ln (P_{e, \text{gross}}) + 0,9298) * (P_{e, \text{gross}})] * 1,25 \quad (21)$$

met:

- $P_{e, \text{gross}}$: elektriciteitsoutput van de STEG-centrale (MW_e)

Deze formule geldt voor een elektriciteitsoutput $\leq 35 MW_e$

$$\text{Aantal werknemers bij STEG-centrale per shift} = [(1,6887 * (P_{e, \text{gross}})^{-0,5539}) * (P_{e, \text{gross}})] * 1,25 \quad (22)$$

met:

- $P_{e, \text{gross}}$: elektriciteitsoutput van de STEG-centrale (MW_e)

Deze formule geldt voor een elektriciteitsoutput $> 35 MW_e$

Vermogen vergassingsinstallatie (MW_e)	$P_{e, \text{gross}}$ (MW_e)	Aantal werknemers per shift bij STEG-centrale (zonder afronding)	Aantal werknemers bij 3 shiften bij STEG-centrale (zonder afronding)
5	5	3,85	11,55
10	10	6,01	18,03
20	20	8,63	25,89
30	30	9,98	29,94
40	40	10,94	32,82
50	50	12,09	36,27

Tabel 49: aantal werknemers STEG-centrale

De totale personeelskosten zijn terug te vinden in onderstaande tabel.

Vermogen vergassingsinstallatie (MW_e)	Totaal aantal werknemers bij 3 shiften (zonder afronding)	Totaal aantal werknemers bij 3 shiften (met afronding)	Totale personeelskosten (EUR)
5	16,62	17	884 000

10	24,81	25	1 300 000
20	35,10	36	1 872 000
30	40,86	41	2 132 000
40	45,18	46	2 392 000
50	49,89	50	2 600 000

Tabel 50: totale personeelskosten vergassing

7.2.3 Aanvoerkosten korte omloophout

Volgens Bridgwater *et al.* (2002) variëren de prijzen voor korte omloophout tussen 10 en 160 EUR per ton droge stof, met een gemiddelde van 70 EUR per ton droge stof. Van den Berg en Wiersma (2004) vermelden prijzen van 45 tot 61 EUR per ton droge stof. Bij Bridgwater *et al.* (1995) vinden we een prijs van 37 EUR per ton droge stof terug. Volgens gegevens van INBO (2007) bedraagt de prijs voor korte omloophout 48,5 EUR per ton droge stof. Senternovem (2006) tenslotte hanteert een marktprijs van 57 EUR per ton droge stof.

Het is echter niet bekend in welke mate de kosten van activiteiten zoals grondstofproductie, transport en voorbehandeling in voorgaande marktprijzen verwerkt zijn. (Van den Berg en Wiersma, 2004) Andere bronnen vermelden de kosten van deze verschillende activiteiten wel en maken bovendien een onderscheid tussen de aankoopkost en de transportkost van korte omloophout. De som van deze laatste twee kosten wordt door Garcia *et al.* (2003) de aanvoerkost genoemd.

Caputo *et al.* (2005) hanteren volgende formules om deze aanvoerkost te berekenen:

$$\text{Totale aankoopkost biomassa} = C_B * M \quad (23)$$

met:

- C_B = aankoopkost biomassa (EUR/ tds)
- M = flow ratio van de biomassa (ton/ jaar)

$$\text{Totale transportkost biomassa} = V + TP \quad (24)$$

met:

- V = vervoerskost biomassa (EUR/ jaar)
- TP = personeelskost van transport (EUR/ jaar)

De transportkosten van biomassa bestaan uit de vervoerskosten van de biomassa en de personeelskosten van de transporteurs. Welke voorafgaande activiteiten geleid hebben tot de aankoopkost van biomassa per ton droge stof wordt echter niet vermeld.

Bij Garcia *et al.* (2003) gebeurt er wel zo een vermelding. Onderstaande tabel verduidelijkt dit alles.

Bron	Aankoopkost	Transportkost
Caputo <i>et al.</i> (2005)	26 EUR/ tds	Transportkost bestaat uit: -Vervoerskost biomassa: totale jaarlijks afgelegde afstand (km) * specifieke vervoerskost per km -Personeelskost transport: aantal transporteurs * jaarloon van 1 transporteur
Garcia <i>et al.</i> (2003)	Aankoopkost bestaat uit: -kost drogen en opslaan: natuurlijk: 0 EUR/ tds ventilatie met onverwarmde lucht en opslag in silo: 6,5 EUR/ tds ventilatie met verwarmde lucht en opslag in silo: 30 EUR/ tds -kost van verkleinen: 40-60 EUR/ tds	4,2 EUR/ tds

Tabel 51: aankoopkost en transportkost korte omloophout

Garcia *et al.* (2003) houden echter geen rekening met de kosten die zijn ontstaan tijdens de oogst en tijdens de teelt van het korte omloophout. Dawson (2007) deed een onderzoek naar de productiekost van korte omloophout. Hij ging uit van een groeicyclus van 25 jaar waarin in het totaal acht keer geoogst werd. De productiekost bedroeg 47,6 EUR per ton droge stof. Met behulp van gegevens van INBO (2007) berekenen we zelf de productiekost per ton droge stof over een periode van 25 jaar, waarin elke 3 jaar geoogst wordt.

Aanleg

- Terreinvoorbereiding
 - sproeien 4 l/ ha * 7 EUR/ l 28 EUR/ ha
 - ploegen 55 EUR/ ha 55 EUR/ ha
 - eggen 50 EUR/ ha 50 EUR/ ha

- Plantgoed (15 000 stekken/ ha * 0,08 €/ stek) 1 200 EUR/ ha
- Plantmachine 400 EUR/ ha

Oogsten

- 8 keer om de 3 jaar = 8 * 800 EUR/ ha 6 400 EUR/ ha
- Ontstronken op het einde 1 500 EUR/ ha

Kapitaalkost

1900 EUR/ ha

Totaal over 25 jaar

11 533 EUR/ ha

Jaarlijkse kost per ha

461,32 EUR/ ha

Kost per ton droge stof

46,93 EUR/ tds

De productiekost per ton droge stof korte omloophout in ons voorbeeld bedraagt 46,93 EUR/ ha en is dus ongeveer even groot als de waarde die Dawson (2007) berekende. Indien we er vanuit gaan dat de landbouwer het geproduceerde korte omloophout voor 50 EUR per ton droge stof verkoopt brengen we naast de kost van aanleg en oogst en de kapitaalkost van de machines een winstmarge van 6,14% voor de landbouwer in rekening.

De geproduceerde wilg dient echter nog een voorbehandeling te ondergaan en getransporteerd te worden. Het drogen van wilg kost 10 EUR per ton natte stof. (Koppejan en de Boer-Meulman, 2005) In paragraaf 6.2.1 werd een vochtigheidspercentage na velddroging van 25% vermeld. De kost van het drogen van wilg bedraagt dus 13,33 EUR per ton droge stof. Na de droging dient de wilg verkleind te worden. De kost voor het verkleinen bedraagt 10 EUR per ton natte stof. (Koppejan en de Boer-Meulman, 2005) Dit cijfer komt overeen met een kost van 13,33 EUR per ton droge stof wilg. Bij Fiala *et al.* (1997) vindt men een transportkost van 0,30 EUR per ton kilometer terug. In 1997 was de dieselprijs 0,668 EUR per liter. (FOD Economie) Bij de

Standaard (2009) vindt men een huidige dieselprijs van 0,915 EUR per liter terug. De dieselprijs is dus met 44% toegenomen. Indien men de transportkost van 0,30 EUR per ton kilometer met dezelfde factor verhoogt verkrijgt men een transportkost van 0,43 EUR per ton kilometer. Dit is de transportkost die tijdens deze studie gehanteerd wordt. Om de transportkost per ton wilg bij vergassing te berekenen wordt de vervoersafstand per lading uit tabel 16 vermenigvuldigd met 0,43. De resultaten van deze berekening worden weergegeven in tabel 52

Netto elektrische output W_{NE} (MW_e)	Transportkost per ton droge stof wilg (EUR)
5	5,15
10	6,99
20	9,64
30	11,54
40	13,17
50	14,56

Tabel 52: transportkost per ton droge stof wilg bij vergassing

Wanneer men deze transportkost optelt bij de kost voor de aanleg en oogst inclusief de winstmarge voor de landbouwer en de kost voor de voorbehandeling van de wilg verkrijgt men de totale aanvoerkost van de wilg. Deze aanvoerkost per ton wilg na afronding is weergegeven in tabel 53.

Netto elektrische output W_{NE} (MW_e)	Aanvoerkost per ton droge stof wilg (EUR)
5	82
10	84
20	86
30	88
40	90
50	91

Tabel 53: aanvoerkost per ton droge stof wilg bij vergassing

De totale aanvoerkosten van korte omloophout (wilg) bij verschillende vermogens van een vergassingsinstallatie worden in tabel 54 weergegeven.

Vermogen vergassingsinstallatie (MW_e)	Aantal ton biomassa (tds)	Totale aanvoerkosten (EUR)
5	19 444	1 594 408

10	35 897	3 015 348
20	68 292	5 873 112
30	97 674	8 595 312
40	127 273	11 454 570
50	155 556	14 155 596

Tabel 54: totale aanvoerkosten korte omloophout bij vergassing

7.2.4 Verzekeringskosten en algemene overheadkosten

Volgens Caputo *et al.* (2005) maken de verzekeringskosten en de algemene overheadkosten samen een percentage van 1% van de totale investeringskosten uit.

Vermogen vergassingsinstallatie (MW _e)	Totale investeringskosten (EUR)	Verzekeringskosten en algemene overheadkosten (EUR)
5	23 296 607	232 966
10	36 142 242	361 422
20	57 521 342	575 213
30	75 658 827	756 588
40	93 191 712	931 917
50	108 181 714	1 081 817

Tabel 55: verzekeringskosten en algemene overheadkosten vergassing

7.2.5 Transport- en behandelingskosten van de assen

Caputo *et al.* (2005) nemen de transport- en behandelingskosten van de assen die achterblijven na het vergassingsproces op in hun analyse. Beide kosten worden als volgt berekend:

$$\text{Transportkosten as} = C_{AT} * M_A \quad (25)$$

met:

- C_{AT}: specifieke transportkosten van de assen (EUR/ ton)
- M_A: flow ratio van de assen (ton/ jaar)

$$\text{Behandelingskosten as} = C_{AD} * M_A \quad (26)$$

met:

- C_{AD} : kost voor het storten van de assen (EUR/ ton)
- M_A : flow ratio van de assen (ton/ jaar)

Caputo *et al.* (2005) stellen C_{AT} gelijk aan 62 EUR/ ton, C_{AD} aan 24 EUR/ ton. De flow ratio van de assen maakt 2% uit van de totale jaarlijkse flow ratio van de biomassa. De transportkosten van de assen en de behandelingskosten van de assen worden weergegeven in onderstaande tabel.

Vermogen vergassingsinstallatie (MW_e)	Aantal ton biomassa (ton droge stof)	Aantal ton assen	Transportkosten assen (EUR)	Behandelingskosten assen (EUR)
5	19 444	389	24 118	9 336
10	35 897	718	44 516	17 232
20	68 292	1 366	84 692	32 784
30	97 674	1 953	121 086	46 872
40	127 273	2 545	157 790	61 080
50	155 556	3 111	192 882	74 664

Tabel 56: transport- en behandelingskosten assen vergassing

7.2.6 Energiekosten

Bij vergassing wordt er verondersteld dat de geproduceerde elektriciteit wordt aangewend om het eigen proces van elektriciteit te voorzien. In wat volgt wordt de besparing berekend die men realiseert door het proces te voorzien van zelf geproduceerde elektriciteit in plaats van elektriciteit van het net.

Volgens Bridgwater *et al.* (2002) is er in een vergassingsinstallatie nood aan 40 kWh elektriciteit per ton droge stof biomassa die wordt aangevoerd. In onderstaande tabel wordt de benodigde hoeveelheid elektriciteit voor de vergassingsinstallatie weergegeven voor de volledige vermogensrange.

Vermogen vergassingsinstallatie (MW_e)	Aantal ton droge stof biomassa M (tds/ jaar)	Benodigde hoeveelheid elektriciteit (kWh)
5	19 444	777 760
10	35 897	1 435 880

20	68 292	2 731 680
30	97 674	3 906 960
40	127 273	5 090 920
50	155 556	6 222 240

Tabel 57: benodigde hoeveelheid elektriciteit vergassingsinstallatie

Ook de STEG-centrale waarin het stookgas wordt omgezet dient voorzien te worden van elektriciteit. Deze STEG-centrale heeft nood aan een percentage elektriciteit van 2,5 tot 3,6% van de totale elektriciteitsoutput. (Bridgwater *et al.*, 2002) Wij gebruiken net zoals Bridgwater *et al.* een percentage van 3%. Tabel 58 geeft de benodigde hoeveelheid elektriciteit weer voor STEG-centrale voor de volledige capaciteitsrange.

Vermogen vergassingsinstallatie (MW _e)	Vermogen vergassingsinstallatie (kWh)	Benodigde hoeveelheid elektriciteit (kWh)
5	35 000 000	1 050 000
10	70 000 000	2 100 000
20	140 000 000	4 200 000
30	210 000 000	6 300 000
40	280 000 000	8 400 000
50	350 000 000	10 500 000

Tabel 58: benodigde hoeveelheid elektriciteit STEG-centrale

Om de energiebesparing in EUR te berekenen wordt de benodigde hoeveelheid elektriciteit vermenigvuldigd met het verschil tussen de aankoopprijs van elektriciteit van het net en de verkoopprijs van de geproduceerde elektriciteit.

Volgens Bridgwater *et al.* (2002) is de gemiddelde elektriciteitsprijs voor grote klanten binnen de Europese Unie 0,075 EUR/ kWh. Coenen *et al.* (2008) voorspellen de elektriciteitsprijs voor het jaar 2009. De piekprijs voor 2009 bedraagt volgens hen 0,093 EUR/ kWh, de dalprijs bedraagt 0,052 EUR/ kWh. Wij hanteren voor onze berekeningen het gemiddelde van deze twee prijzen: 0,0725 EUR/ kWh. Deze prijs ligt in de buurt van de prijs van 0,0744 EUR/ kWh die men terugvindt bij Sibelga (2009). In deze prijs zijn de taksen en de prijs die de klant betaalt voor het gebruik van het elektriciteitsnet inbegrepen.

Volgens Cleijne *et al.* (2006) bedraagt de verkoopprijs van elektriciteit 0,059 EUR per kWh. In 2003 was de geldende gemiddelde prijs van elektriciteit 0,027 EUR per kWh. Van den Berg en Wiersma, (2004) Bij Thewys en Kuppens (2008) vinden we een verkoopprijs

van elektriciteit van 0,045 EUR/ kWh terug. In deze studie wordt een verkoopprijs van 0,05 EUR/ kWh verondersteld. Het gaat hier om de prijs die de producent van elektriciteit ontvangt. In deze prijs zijn de taken en de prijs die de klant betaalt voor het gebruik van het elektriciteitsnet dus niet inbegrepen.

Met behulp van voorgaande gegevens is het mogelijk om de besparing te berekenen van het gebruik van eigen elektriciteit in plaats van elektriciteit van het net. De aankoopprijs van elektriciteit bedraagt 0,0725 EUR per kilowattuur, de verkoopprijs van elektriciteit bedraagt 0,05 EUR per kilowattuur. Om de totale energiebesparing aan elektriciteit in EUR te berekenen vermenigvuldigt men het verschil van 0,0725 EUR per kilowattuur en 0,05 EUR per kilowattuur met de benodigde hoeveelheid elektriciteit van het vergassingsproces.

Vermogen vergassingsinstallatie (MW_e)	Totale besparing elektriciteit (EUR)
5	41 125
10	79 557
20	155 963
30	229 657
40	303 546
50	376 250

Tabel 59: totale besparing elektriciteit vergassing

Een kost die men in rekening dient te brengen is de aankoopkost van water. Voor de vergassingsinstallatie is deze kost verwaarloosbaar klein. Bij de STEG-centrale heeft men nood aan 2,1 ton water per MWh geproduceerde elektriciteit. In het Verenigd Koninkrijk bedroeg de prijs voor water in 1999 1,27 EUR/ m³. (Brammer, J.G. *et al.*) Bridgwater *et al.* (2002) hanteren een prijs van 1,50 EUR/ m³. Wij werken verder met deze laatste prijs. Om de totale kosten van water voor de vergassingsinstallatie te bepalen vermenigvuldigen we het aantal MWh geproduceerde elektriciteit met het aantal ton water per MWh en met de prijs van water per ton. De berekening hiervan ziet u in onderstaande tabel.

Vermogen vergassingsinstallatie (MW_e)	Vermogen vergassingsinstallatie (MWh)	Benodigde hoeveelheid water (ton)	Totale kosten water STEG-centrale (EUR)
5	35 000	73 500	110 250

10	70 000	147 000	220 500
20	140 000	294 000	441 000
30	210 000	441 000	661 500
40	280 000	588 000	882 000
50	350 000	735 000	1 102 500

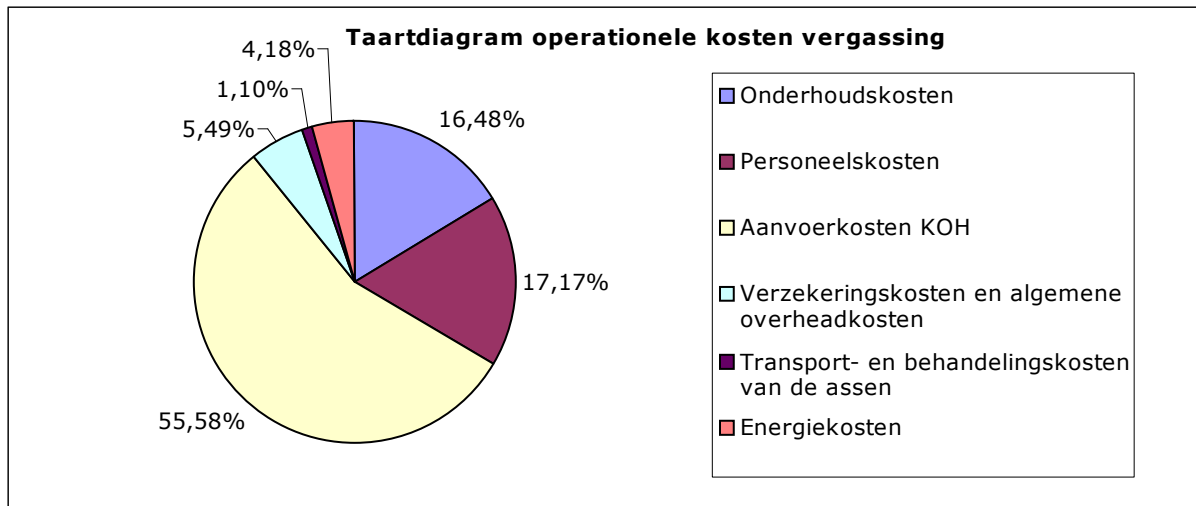
Tabel 60: totale kosten water STEG-centrale

Tabel 61 geeft een overzicht van de jaarlijkse operationele kosten van vergassing voor een capaciteit van 5 tot 50 MW_e.

	5 MW _e	10 MW _e	20 MW _e	30 MW _e	40 MW _e	50 MW _e
Onderhoudskosten	698 898	1 084 267	1 725 640	2 269 765	2 795 751	3 245 451
Personeelskosten	884 000	1 300 000	1 872 000	2 132 000	2 392 000	2 600 000
Aanvoerkosten KOH	1 594 408	3 015 348	5 873 112	8 595 312	11 454 570	14 155 596
Verzekeringskosten en algemene overheadkosten	232 966	361 422	575 213	756 588	931 917	1 081 817
Transport- en behandelingskosten van de assen	33 454	61 748	117 476	167 958	218 870	267 546
Energiekosten	110 250	220 500	441 000	661 500	882 000	1 102 500
Totale jaarlijkse operationele kosten vergassing	3 553 976	6 043 285	10 604 441	14 583 123	18 675 108	22 452 910

Tabel 61: totale jaarlijkse operationele kosten vergassing

In onderstaande figuur wordt de relatieve bijdrage van de verschillende kostencategorieën aan de totale operationele kosten weergegeven. De berekeningen zijn gebeurd op basis van het gemiddelde van de kostencategorieën over de verschillende vermogens. De aanvoerkosten van het korte omloophout vormen hier de grootste kostencategorie, gevolgd door de personeelskosten en de onderhoudskosten.



Figuur 12: taartdiagram operationele kosten vergassing

In onderstaande tabel wordt het aandeel van de initiële investeringskost in de totale kosten weergegeven voor de verschillende capaciteiten. Onder de totale kosten verstaan we de totale operationele kosten gedurende 20 jaar en de initiële investeringskost.

Vermogen vergassingsinstallatie (MW _e)	Aandeel initiële investering in totale kosten (%)
5	35,13
10	33,71
20	31,97
30	31,17
40	30,44
50	29,75

Tabel 62: aandeel initiële investering in totale kosten bij gescheiden productie elektriciteit vergassing

Naarmate het vermogen van de vergassingsinstallatie toeneemt daalt het aandeel van de initiële investeringskost in de totale kosten. De reden hiervoor is dat de schaalvoordelen bij de initiële investeringskost groter zijn dan bij de totale operationele kosten.

7.3 Operationele kosten pyrolyse

De operationele kosten van pyrolyse bestaan uit onderhoudskosten, personeelskosten, aanvoerkosten van het korte omloophout, verzekeringskosten, algemene overheadkosten, verwerkingskosten van de cokes en energiekosten.

7.3.1 Onderhoudskosten

Volgens Caputo *et al.* (2005) maken de onderhoudskosten 2,5% van de totale investeringskosten uit. Selinger (2002) en Islam en Ani (2000) hebben het over 3%, Brammer *et al.* over 4%. Van Stijn (2008) hanteert voor de onderhoudskosten een percentage van 5% van de totale investeringskosten. In deze analyse wordt een percentage van 3% aan jaarlijkse onderhoudskosten verondersteld.

Vermogen pyrolyse-installatie (MW _e)	Totale investeringskosten (EUR)	Onderhoudskosten (EUR)
5	11 484 394	344 532
10	18 438 133	553 144
20	29 707 680	891 230
30	39 332 393	1 179 972
40	48 033 272	1 440 998
50	56 110 136	1 683 304

Tabel 63: onderhoudskosten pyrolyse

7.3.2 Personeelskosten

Caputo *et al.* (2005) hanteren voor de berekening van de operationele personeelskosten de volgende formule:

$$\text{Operationele personeelskosten (EUR)} = C_p * n \quad (27)$$

met:

- C_p: gemiddelde jaarloon per werknemer (EUR)
- n: totaal aantal werknemers

Tabel 64 geeft een overzicht van het gemiddelde jaarloon per arbeider voor verschillende bronnen.

Bron	Siemons, R.V (2005)	Putsche <i>et al.</i> (2006)	Bridgwater, A. V. <i>et al.</i> (1995)
Gemiddeld jaarloon per arbeider (EUR)	30 000	23 937	23 622

Tabel 64: overzicht gemiddeld jaarloon per arbeider

Net zoals bij vergassing veronderstellen we een jaarlijkse kost per werknemer van 52 000 EUR.

In wat volgt wordt het totaal aantal werknemers n voor een pyrolyse-installatie en de daaropvolgende dieselmotor berekend. Net zoals bij vergassing wordt er in drie shiften gewerkt.

Aantal werknemers bij een pyrolyse-installatie per shift = $1,04 * (Q_{dry})^{0,475}$ (28)
 met:

- Q_{dry} : flow ratio van aangevoerde biomassa (tds/ uur)

Merk op dat bovenstaande formule dezelfde is als die voor de berekening van het aantal werknemers bij de vergassingsinstallatie.

Vermogen pyrolyse-installatie (MW _e)	Q _{dry} (tds/ uur)	Aantal werknemers per shift bij pyrolyse-installatie (zonder afronding)	Aantal werknemers bij 3 shiften (zonder afronding)
5	3,81	1,96	5,89
10	7,62	2,73	8,19
20	15,24	3,79	11,38
30	22,86	4,60	13,79
40	30,48	5,27	15,81
50	38,10	5,86	17,58

Tabel 65: aantal werknemers bij pyrolyse-installatie

Aantal werknemers bij dieselmotor per shift = $0,4847 * (P_{e,gross} - P_{e,gen})^{0,483}$ (29)

met:

- $P_{e,gross}$: elektriciteitsoutput van de dieselmotor (MW_e)
- $P_{e,gen}$: interne benodigde elektriciteit van de motoren (MW_e)

De intern benodigde hoeveelheid elektriciteit van de dieselmotor bedraagt 3% van de totale elektriciteitsproductie. (Bridgwater *et al.*, 2002)

Vermogen pyrolyse-installatie (MW _e)	P _{e,gross} (MW _e)	P _{e,gen} (MW _e)	Aantal werknemers per shift bij dieselmotor (zonder afronding)	Aantal werknemers bij 3 shiften (zonder afronding)
5	5	0,15	1,04	3,12
10	10	0,30	1,45	4,36
20	20	0,60	2,03	6,09
30	30	0,90	2,47	7,41
40	40	1,20	2,84	8,51
50	50	1,50	3,16	9,48

Tabel 66: aantal werknemers bij dieselmotor

De totale personeelskosten vindt men terug in onderstaande tabel.

Vermogen pyrolyse-installatie (MW _e)	Totaal aantal werknemers (zonder afronding)	Totaal aantal werknemers (met afronding)	Totale personeelskosten (EUR)
5	9,01	10	520 000
10	12,55	13	676 000
20	17,47	18	936 000
30	21,2	22	1 144 000
40	24,32	25	1 300 000
50	27,06	28	1 456 000

Tabel 67: totale personeelskosten bij pyrolyse

7.3.3 Aanvoerkosten korte omloophout

De kosten van aanleg, oogst en voorbehandeling per ton wilg zijn even groot als bij vergassing. De transportkosten zijn echter afhankelijk van de vervoersafstand per lading uit tabel 17. De transportkost per lading kilometer bedraagt ook hier 0,43 EUR.

Netto elektrische output W _{NE} (MW _e)	Transportkost per ton droge stof wilg (EUR)
5	6,03
10	8,52
20	12,05
30	14,77
40	17,05
50	19,53

Tabel 68: transportkost per ton droge stof wilg bij pyrolyse

De transportkosten bij pyrolyse lopen hoog op. Om deze kosten te verlagen kan men bijvoorbeeld beroep doen op mobiele pyrolyse. Hierbij wordt de pyrolyse-installatie als het ware verplaatst naar de bron van de biomassa, in plaats van de biomassa naar de pyrolyse-installatie te verplaatsen. De biomassa wordt in de mobiele installatie omgezet in pyrolyse-olie. Men heeft dus het voordeel dan men enkel de pyrolyse-olie met een hoge energiedichtheid dient te vervoeren in plaats van grote volumes biomassa met een lagere energiedichtheid. (Biopact, 2007) Hierdoor dalen de transportkosten.

Wanneer men de transportkost uit tabel 68 optelt bij de kost voor de aanleg en oogst en de kost voor de voorbehandeling van de wilg verkrijgt men de totale aanvoerkost van wilg. Deze aanvoerkost per ton wilg na afronding is weergegeven in tabel 69.

Netto elektrische output W_{NE} (MW_e)	Aanvoerkost per ton droge stof wilg (EUR)
5	83
10	85
20	89
30	91
40	94
50	96

Tabel 69: aanvoerkost per ton droge stof wilg bij pyrolyse

Tabel 70 geeft de totale aanvoerkosten van korte omloophout (wilg) weer bij de verschillende vermogens van de pyrolyse-installatie.

Vermogen pyrolyse-installatie (MW_e)	Aantal ton biomassa (tds)	Totale Aanvoerkosten (EUR)
5	26 667	2 213 361
10	53 333	4 533 305
20	106 667	9 493 363
30	160 000	14 560 000
40	213 333	20 053 302
50	266 667	25 600 032

Tabel 70: totale aanvoerkosten korte omloophout bij pyrolyse

7.3.4 Verzekeringskosten

De verzekeringskosten maken 2% uit van de totale investeringskosten. (Islam en Ani, 2000)

Vermogen pyrolyse-installatie (MW _e)	Totale investeringskosten (EUR)	Verzekeringskosten (EUR)
5	11 484 394	229 688
10	18 438 133	368 763
20	29 707 680	594 154
30	39 332 393	786 648
40	48 033 272	960 665
50	56 110 136	1 122 203

Tabel 71: verzekeringskosten pyrolyse

7.3.5 Algemene overheadkosten

Islam en Ani (2000), Bridgwater *et al.* (2002) en Selinger (2002) beschouwen de algemene overheadkosten als 2% van de totale investeringskosten. Volgens Brammer *et al.* maken de algemene overheadkosten 4% uit van de totale investeringskosten. Tijdens de berekeningen wordt een percentage van 2,5% aangenomen.

Vermogen pyrolyse-installatie (MW _e)	Totale investeringskosten (EUR)	Algemene overheadkosten (EUR)
5	11 484 394	287 110
10	18 438 133	460 953
20	29 707 680	742 692
30	39 332 393	983 310
40	48 033 272	1 200 832
50	56 110 136	1 402 753

Tabel 72: algemene overheadkosten bij pyrolyse

7.3.6 Verwerkingskosten cokes

Volgens Katleen van den Eynden van OVAM, die per e-mail gecontacteerd werd, bedraagt de kost voor het storten van de cokes op een stortplaats van categorie II voor anorganische afvalstoffen gemiddeld 75 EUR per ton met een heffing van 39 EUR per ton. Op een stortplaats van categorie II worden huishoudelijke en vergelijkbare en niet-

gevaarlijke bedrijfsafvalstoffen toegelaten. (Schotte, 2001) Siemons (2005) gaat er van uit dat de verwerkingskosten van de cokes 73 EUR/ ton bedragen.

Voorlopig wordt er in deze studie echter verondersteld dat de aangevoerde biomassa niet vervuild is met metalen. Hierdoor kunnen de cokes aangewend worden om het pyrolyseproces te voorzien van elektriciteit en warmte. In hoofdstuk 10 wordt de invloed nagegaan op de NCW wanneer de aangevoerde biomassa vervuild is met metalen en dus gestort dient te worden.

7.3.7 Energiekosten

Aangezien er voorlopig nog wordt verondersteld dat de aangevoerde biomassa niet met metalen vervuild is kan de elektriciteit die nodig is voor de voorziening van de pyrolyse-installatie en de dieselmotor opgewekt worden uit de verbranding van het niet-condenseerbaar gas en de cokes die ontstaan tijdens het pyrolyseproces. In wat volgt wordt de besparing berekend van de productie van elektriciteit door middel van de verbranding van het niet-condenseerbaar gas en de cokes in plaats van de aankoop van elektriciteit van het net.

Net zoals bij vergassing is er 40 kWh elektriciteit nodig per ton droge stof biomassa die wordt aangevoerd. (Bridgwater *et al.*, 2002)

Vermogen pyrolyse-installatie (MW_e)	Aantal ton droge stof biomassa M (tds/ jaar)	Benodigde hoeveelheid elektriciteit (kWh)
5	26 667	1 066 680
10	53 333	2 133 320
20	106 667	4 266 680
30	160 000	6 400 000
40	213 333	8 533 320
50	266 667	10 666 680

Tabel 73: benodigde hoeveelheid elektriciteit pyrolyse-installatie

Ook de dieselmotor dient voorzien te worden van elektriciteit. De benodigde elektriciteit voor de dieselmotor bedraagt 3% van de totale elektriciteitsproductie. (Bridgwater *et al.*, 2002)

Vermogen pyrolyse-installatie (MW _e)	Vermogen pyrolyse-installatie (kWh)	Benodigde hoeveelheid elektriciteit (kWh)
5	35 000 000	1 050 000
10	70 000 000	2 100 000
20	140 000 000	4 200 000
30	210 000 000	6 300 000
40	280 000 000	8 400 000
50	350 000 000	10 500 000

Tabel 74: benodigde hoeveelheid elektriciteit dieselmotor

In de veronderstelling dat de geproduceerde cokes niet op een andere manier gevaloriseerd kunnen worden, kan men de totale besparing aan elektriciteitskosten berekenen door de aankoop prijs van elektriciteit van 0,0725 EUR per kWh te vermenigvuldigen met de benodigde hoeveelheid elektriciteit in kilowattuur. De resultaten van deze berekening zijn weergegeven in tabel 75.

Vermogen pyrolyse-installatie (MW _e)	Totale besparing elektriciteit (EUR)
5	153 459
10	306 916
20	613 834
30	920 750
40	1 227 666
50	1 534 584

Tabel 75: totale besparing elektriciteit pyrolyse

De pyrolyse-installatie verbruikt gemiddeld 18,5 m³ koelwater per ton droge stof korte omloophout. (Bridgwater *et al.*, 2002) Er wordt een prijs van 1,50 EUR/ m³ aangenomen.

Vermogen pyrolyse-installatie (MW _e)	Aantal ton droge stof biomassa M (tds/ jaar)	Benodigde hoeveelheid water (m ³)	Totale kosten water pyrolyse-installatie (EUR)
5	26 667	493 340	740 009
10	53 333	986 661	1 479 991
20	106 667	1 973 340	2 960 009
30	160 000	2 960 000	4 440 000
40	213 333	3 946 661	5 919 991
50	266 667	4 933 340	7 400 009

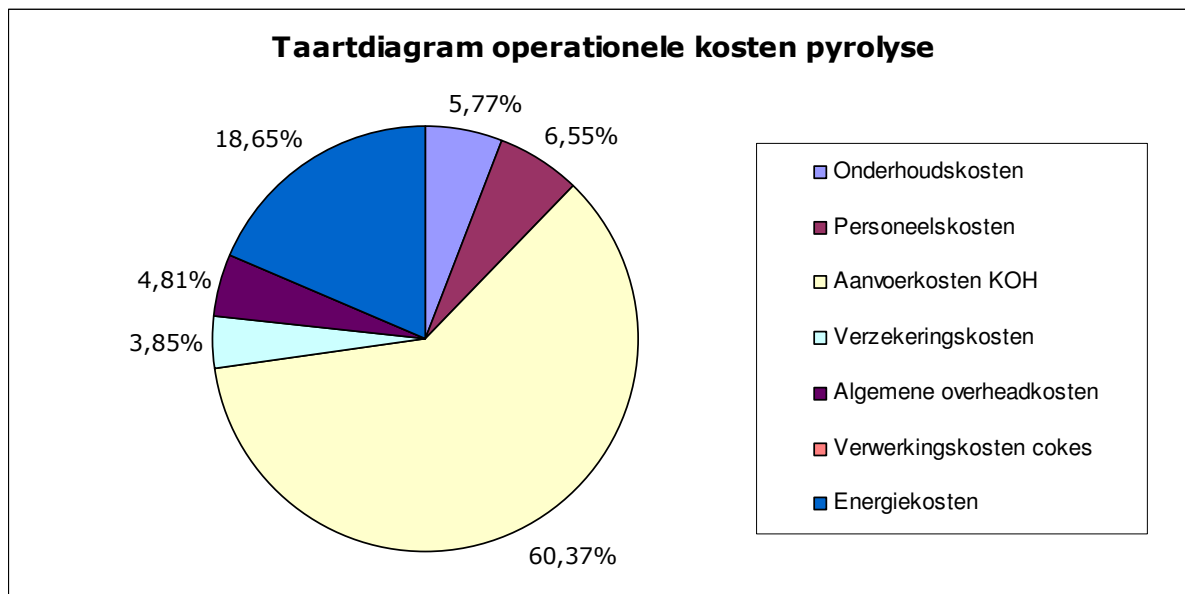
Tabel 76: totale kosten water bij pyrolyse-installatie

Tabel 77 geeft een overzicht van de jaarlijkse operationele kosten van pyrolyse voor een capaciteit van 5 tot 50 MW_e.

	5 MW _e	10 MW _e	20 MW _e	30 MW _e	40 MW _e	50 MW _e
Onderhoudskosten	344 532	553 144	891 230	1 179 972	1 440 998	1 683 304
Personeelskosten	520 000	676 000	936 000	1 144 000	1 300 000	1 456 000
Aanvoerkosten KOH	2 213 361	4 533 305	9 493 363	14 560 000	20 053 302	25 600 032
Verzekeringskosten	229 688	368 763	594 154	786 648	960 665	1 122 203
Algemene overheadkosten	287 110	460 953	742 692	983 310	1 200 832	1 402 753
Verwerkingskosten cokes	0	0	0	0	0	0
Energiekosten	740 009	1 479 991	2 960 009	4 440 000	5 919 991	7 400 009
Totale operationele kosten pyrolyse	4 334 700	8 072 156	15 617 448	23 093 930	30 875 788	38 664 301

Tabel 77: totale jaarlijkse operationele kosten pyrolyse

In onderstaande figuur wordt de relatieve bijdrage van de verschillende kostencategorieën aan de totale operationele kosten weergegeven. De berekeningen zijn gebeurd op basis van het gemiddelde van elke kost over de verschillende vermogens. De aanvoerkosten van het korte omloophout maken maar liefst 60,37% uit van de totale operationele kosten. Het aandeel van de energiekosten ligt een stuk hoger dan bij vergassing. De reden hiervoor is het hoge verbruik van koelwater tijdens het pyrolyseproces.



Figuur 13: taartdiagram operationele kosten pyrolyse

In onderstaande tabel wordt het aandeel van de initiële investeringskost in de totale kosten (totale operationele kosten gedurende 20 jaar en de initiële investeringskost) weergegeven voor de verschillende capaciteiten.

Vermogen pyrolyse-installatie (MW _e)	Aandeel initiële investering in totale kosten (%)
5	17,55
10	15,57
20	13,78
30	12,69
40	11,81
50	11,15

Tabel 78: aandeel initiële investering in totale kosten bij gescheiden productie elektriciteit pyrolyse

Net zoals bij vergassing stellen we een daling van het aandeel van de initiële investeringskosten in de totale kosten vast naarmate het vermogen van de installatie toeneemt. De reden hiervoor is opnieuw een groter schaalvoordeel in de initiële investeringskost dan in de operationele kosten. De percentages in tabel 78 zijn voor alle capaciteiten kleiner dan de percentages in tabel 62. Dit kunnen we verklaren door het feit dat bij pyrolyse de initiële investeringskost lager is en de totale operationele kosten hoger zijn dan bij vergassing.

7.4 Operationele opbrengsten

Naast de kaskosten bevatten de vrije operationele kasstromen de kasopbrengsten. Wij veronderstellen dat de enige kasopbrengsten van vergassing de opbrengsten uit de verkoop van geproduceerde elektriciteit en de opbrengsten uit de verkoop van groenestroomcertificaten zijn.

7.4.1 Opbrengsten uit verkoop elektriciteit afkomstig van vergassing

Bij vergassing wordt de geproduceerde elektriciteit aangewend om het eigen proces van elektriciteit te voorzien. Men trekt dus de benodigde hoeveelheid elektriciteit uit tabel 57 en 58 af van de totale hoeveelheid geproduceerde elektriciteit. Dit verschil geeft de totale hoeveelheid afgezette elektriciteit in kilowattuur. Om de totale opbrengsten uit de verkoop van elektriciteit te berekenen wordt de totale hoeveelheid afgezette elektriciteit vermenigvuldigd met de verkoopprijs van elektriciteit van 0,05 EUR /kWh. Het gaat hier om dezelfde verkoopprijs als in paragraaf 7.2.6.

Vermogen vergassings-installatie (MW_e)	Totale hoeveelheid geproduceerde elektriciteit (kWh)	Totale hoeveelheid afgezette elektriciteit (kWh)	Prijs van 1 kWh elektriciteit (EUR)	Totale opbrengsten uit verkoop van elektriciteit (EUR)
5	35 000 000	33 172 240	0,05	1 658 612
10	70 000 000	66 464 120	0,05	3 323 206
20	140 000 000	133 068 320	0,05	6 653 416
30	210 000 000	199 793 040	0,05	9 989 652
40	280 000 000	266 509 080	0,05	13 325 454
50	350 000 000	333 277 760	0,05	16 663 888

Tabel 79: totale opbrengsten uit verkoop van geproduceerde elektriciteit bij vergassing

7.4.2 Opbrengsten uit verkoop elektriciteit afkomstig van pyrolyse

Bij pyrolyse wordt het eigen proces voorzien van elektriciteit door de verbranding van cokes en het niet-condenseerbaar gas. De totale hoeveelheid afgezette elektriciteit is hier dus gelijk aan de totale hoeveelheid geproduceerde elektriciteit. Uiteraard wordt opnieuw een verkoopprijs van 0,05 EUR/ kWh gebruikt.

Vermogen pyrolyse-installatie (MW_e)	Totale hoeveelheid geproduceerde elektriciteit (kWh)	Totale hoeveelheid afgezette elektriciteit (kWh)	Prijs van 1 kWh elektriciteit (EUR)	Totale opbrengsten uit verkoop van elektriciteit (EUR)
5	35 000 000	35 000 000	0,05	1 750 000
10	70 000 000	70 000 000	0,05	3 500 000
20	140 000 000	140 000 000	0,05	7 000 000
30	210 000 000	210 000 000	0,05	10 500 000
40	280 000 000	280 000 000	0,05	14 000 000
50	350 000 000	350 000 000	0,05	17 500 000

Tabel 80: totale opbrengsten uit verkoop van geproduceerde elektriciteit bij pyrolyse

Een pyrolyse-installatie met een elektriciteitsoutput van 35 000 000 kWh per jaar kan 10 000 gezinnen van elektriciteit voorzien. Het gemiddelde elektriciteitsverbruik per gezin bedraagt immers 3 500 kWh per jaar. (VREG, 2007) In Het Belang van Limburg van 9 april 2009 verscheen een artikel van Guy Thuwis over een biogascentrale die in Neerpelt zal worden gebouwd. Deze centrale heeft een capaciteit van 2,5 MW_e. Bij 7 000 operationele uren komt dit overeen met 17 500 000 kWh. Volgens Thuwis kan deze installatie 5 000 tot 7 000 gezinnen per jaar van elektriciteit voorzien. Hieruit kunnen we afleiden dat Thuwis veronderstelt dat een gezin gemiddeld tussen 2 500 en 3 500 kWh elektriciteit per jaar verbruikt.

7.4.3 Groenestroomcertificaten

Zoals vermeld in paragraaf 4.8 komt de eigenaar van een vergassingsinstallatie of pyrolyse-installatie in aanmerking voor groenestroomcertificaten. De producent ontvangt 1 certificaat per MWh groene stroom, onafhankelijk van het feit of men deze stroom verkoopt of aanwendt voor eigen gebruik. (VREG, 2007) In oktober 2008 bedroeg de gemiddelde prijs van één groenestroomcertificaat 106,89 EUR. (VREG, 2008) Onderstaande tabel geldt zowel voor vergassing als voor pyrolyse.

Vermogen installatie (MW_e)	Aantal MWh	Aantal certificaten	Opbrengsten uit verkoop groenestroom-certificaten (EUR)
5	35 000	35 000	3 741 150
10	70 000	70 000	7 482 300
20	140 000	140 000	14 964 600

30	210 000	210 000	22 446 900
40	280 000	280 000	29 929 200
50	350 000	350 000	37 411 500

Tabel 81: jaarlijkse opbrengsten uit verkoop groenestroomcertificaten

7.5 NCW van vergassing en pyrolyse

Zoals vermeld in paragraaf 5.5 kan de NCW met behulp van onderstaande formule worden berekend.

$$NCW = [(1-b) \times (O_t - Q_t) + b (I_0/n)] a_{n-r} - I_0$$

In tabellen 82 en 83 worden de totale netto kasopbrengsten na belastingen berekend voor een capaciteit van 5 tot 50 MW_e voor zowel vergassing als voor pyrolyse.

	5 MW_e	10 MW_e	20 MW_e	30 MW_e	40 MW_e	50 MW_e
Kasopbrengsten Q _t (EUR)	5 399 762	10 805 506	21 618 016	32 436 552	43 254 654	54 075 388
Kaskosten Q _t (EUR)	3 553 976	6 043 285	10 604 441	14 583 123	18 675 108	22 452 910
Netto kasopbrengsten voor belastingen (Q _t - Q _t) (EUR)	1 845 786	4 762 221	11 013 575	17 853 429	24 579 546	31 622 478
Netto kasopbrengsten na belastingen (1-b) x (Q _t - Q _t) (EUR)	1 236 677	3 190 688	7 379 095	11 961 797	16 468 296	21 187 060
Belastingenschild afschrijvingen b x (I ₀ / n) (EUR)	384 394	596 347	949 102	1 248 334	1 537 663	1 784 998
Totale netto kasopbrengsten na belastingen (1-b) x (O _t - Q _t) + b (I ₀ / n) (EUR)	1 621 071	3 787 035	8 328 197	13 210 131	18 005 959	22 972 058

Tabel 82: berekening totale jaarlijkse netto kasopbrengsten vergassing

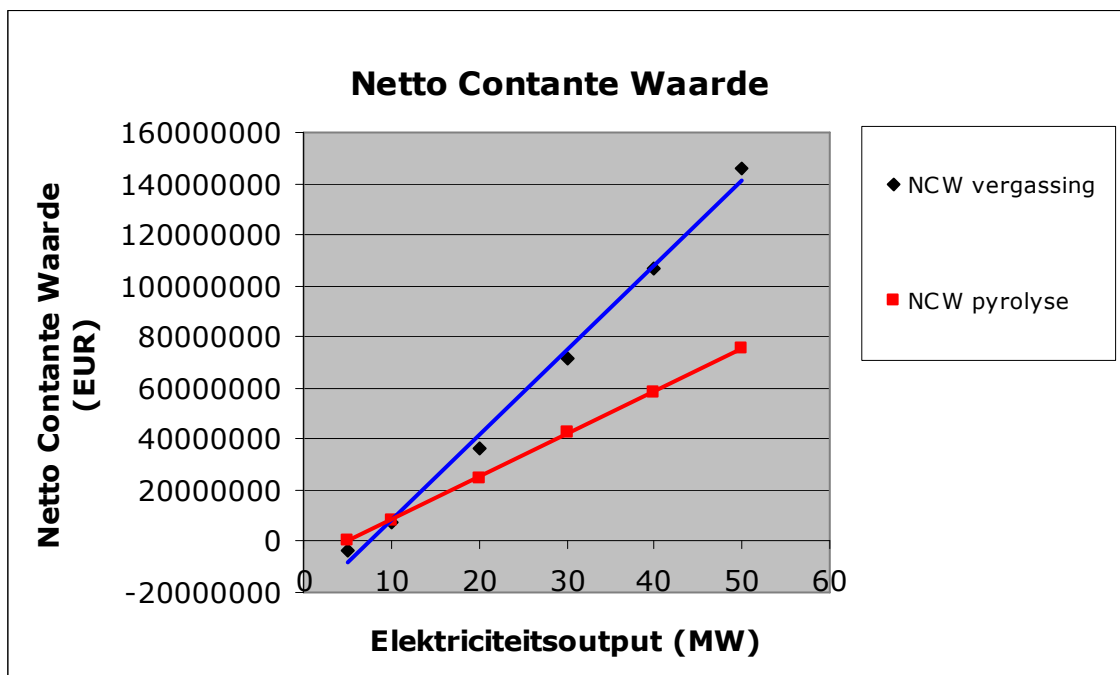
	5 MW_e	10 MW_e	20 MW_e	30 MW_e	40 MW_e	50 MW_e
Kasopbrengsten Q_t (EUR)	5 491 150	10 982 300	21 964 600	32 946 900	43 929 200	54 911 500
Kaskosten Q_t (EUR)	4 334 700	8 072 156	15 617 448	23 093 930	30 875 788	38 664 301
Netto kasopbrengsten voor belastingen ($Q_t - Q_t$) (EUR)	1 156 450	2 910 144	6 347 152	9 852 970	13 053 412	16 247 199
Netto kasopbrengsten na belastingen (1-b) x ($Q_t - Q_t$) (EUR)	774 822	1 949 796	4 252 592	6 601 490	8 745 786	10 885 623
Belastingenschild afschrijvingen b x (I_0/n) (EUR)	189 493	304 229	490 177	648 984	792 549	925 817
Totale netto kasopbrengsten na belastingen (1-b) x ($O_t - Q_t$) + b (I_0/n) (EUR)	964 315	2 254 025	4 742 769	7 250 474	9 538 335	11 811 440

Tabel 83: berekening totale jaarlijkse netto kasopbrengsten pyrolyse

Tijdens de berekeningen wordt een belastingsvoet b van 33% en een kapitaalkost r^* vóór belastingen van 10% gehanteerd. De kapitaalkost r na belastingen is dan 6,7%. De levensduur n van het project is 20 jaar. Onderstaande tabel geeft de netto contante waarde weer voor zowel vergassing als pyrolyse voor de verschillende vermogens.

Vermogen (MW_e)	NCW vergassing (EUR)	NCW pyrolyse (EUR)
5	-3 294 578	452 964
10	7 741 888	8 298 796
20	36 272 086	24 367 719
30	71 643 951	42 236 070
40	106 668 357	58 620 106
50	146 006 467	75 452 474

Tabel 84: netto contante waarde vergassing en pyrolyse



Figuur 14: netto contante waarde in functie van elektriciteitsoutput (vergassing en pyrolyse bij enkel elektriciteitsopwekking)

Voor alle capaciteiten ligt de investeringkost van de vergassingsinstallatie veel hoger dan die van de pyrolyse-installatie. De jaarlijkse operationele kosten zijn dan weer het hoogst bij pyrolyse. Dit is vooral te wijten aan de hoge energiekosten en de hoge aanvoerkosten van het korte omloophout ten gevolge van de lagere elektrische efficiëntie. De operationele opbrengsten zijn het hoogst voor pyrolyse. Bij pyrolyse kan men immers alle geproduceerde elektriciteit verkopen aangezien de elektriciteit die nodig is voor het pyrolyseproces wordt gegenereerd door de verbranding van cokes en het niet-condenseerbare gas. Bij vergassing wordt een deel van de geproduceerde elektriciteit aangewend om het eigen proces van elektriciteit te voorzien. Hierdoor kan men niet de volledige hoeveelheid geproduceerde elektriciteit afzetten. De opbrengsten uit de verkoop van groenestroomcertificaten zijn even groot voor beide technieken.

Uit figuur 14 blijkt dat de NCW van de investering in een vergassingsinstallatie voor een lage capaciteit kleiner is dan de NCW van de investering in een pyrolyse-installatie. Bij hogere capaciteiten is de NCW groter bij vergassing dan bij pyrolyse. Bij een capaciteit van 5 MW_e en 10 MW_e worden de hogere investeringskost en de lagere operationele opbrengsten van vergassing niet gecompenseerd door de lagere jaarlijkse operationele kosten ten opzichte van pyrolyse. Bij hogere capaciteiten is dit wel het geval. Bij vergassing is de NCW zelfs negatief bij een capaciteit van 5 MW_e. Men slaagt er niet in

om binnen de 20 jaar de initiële investering van 20 876 123 EUR te compenseren door de jaarlijkse totale netto kasopbrengsten na belastingen van 1 621 071 EUR.

Tabel 85 geeft weer welke techniek de voorkeur verdient bij een bepaald vermogen op basis van de NCW.

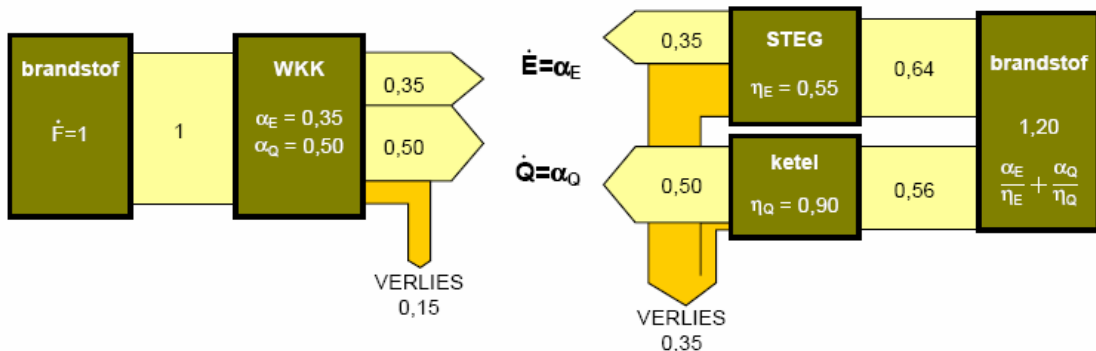
Vermogen (MW_e)	Keuze bij gescheiden productie elektriciteit
5	Pyrolyse
10	Pyrolyse
20	Vergassing
30	Vergassing
40	Vergassing
50	Vergassing

Tabel 85 : keuze tussen vergassing en pyrolyse bij gescheiden productie elektriciteit

Hoofdstuk 8: Vergassing en pyrolyse met WKK

8.1 Inleiding

In paragraaf 4.7 werd vermeld dat bij een warmtekrachtkoppeling de in de brandstof aanwezige energie veel beter benut wordt dan dat het geval is bij gescheiden productie van elektriciteit en warmte. Hierdoor heeft de warmtekrachtkoppeling dus beduidend minder brandstof nodig dan bij gescheiden productie. Dit wordt geïllustreerd in onderstaande figuur.



Figuur 15: vereenvoudigde voorstelling van de energetische balans tussen een warmtekrachtkoppeling (links) en een gescheiden productie (rechts)

Bron: Commissie Ampere

In deze figuur veronderstelt men dat beide installaties eenzelfde elektrisch vermogen \dot{E} en eenzelfde warmtevermogen \dot{Q} produceren. Het elektrisch rendement η_E van de STEG is 55%, het thermisch rendement van de ketel η_Q is 90%. Bij de warmtekrachtkoppeling wordt een elektrisch rendement α_E van 35% en een thermisch rendement α_Q van 50% verondersteld. Hierbij is het elektrisch rendement de verhouding van het nuttig geleverd elektrisch vermogen \dot{E} en het toegevoerd brandstofvermogen \dot{F} . Het thermisch rendement is gelijk aan de verhouding van het nuttig geproduceerd warmtevermogen \dot{Q} tot \dot{F} . (Commissie Ampere)

Voor de warmtekrachtkoppeling wordt in figuur 15 de brandstofinput \dot{F} gelijk gesteld aan 1. Hierdoor ontstaan volgende gelijkheden:

$$\dot{E} = \alpha_E$$

$$\dot{Q} = \alpha_Q$$

Het totale rendement van een WKK-installatie wordt als volgt gedefinieerd:

$$\alpha_{\text{tot}} = \frac{\dot{E}}{\dot{F}_{\text{WKK}}} + \frac{\dot{Q}}{\dot{F}_{\text{WKK}}} = \alpha_E + \alpha_Q \quad (30)$$

met:

- \dot{E} = het geleverd elektrisch vermogen (MW_e)
- \dot{Q} = het geleverd thermisch vermogen (MW_{th})
- \dot{F}_{WKK} = toegevoerd brandstofvermogen (MW)
- α_{tot} = het totale rendement (%)
- α_E = het elektrisch rendement (%)
- α_Q = het thermisch rendement (%)

Toegepast op het voorbeeld uit figuur 15 is het totale rendement van de warmtekrachtkoppeling gelijk aan 85%. Het totale rendement bij de gescheiden productie van elektriciteit en warmte is gelijk aan slechts 70,8%. Aangezien warmte en arbeid niet equivalent zijn is het beter om te spreken van de brandstofbenuttingsgraad α_{tot} van de warmtekrachtinstallatie. (Commissie Ampere)

Tabel 86 geeft de omzettingsrendementen van een warmtekrachtkoppeling bij vergassing en pyrolyse weer.

Bron	Conversietechniek	Elektrisch rendement (%)	Thermisch rendement (%)
Coenen <i>et al.</i> (2008)	Vergassing	25 - 28	40
Coenen <i>et al.</i> (2008)	Pyrolyse	25	50

Tabel 86: elektrisch en thermisch rendement WKK

Tijdens de economische analyse wordt een elektrisch rendement van 25% en een thermisch rendement van 40% gehanteerd voor vergassing.

In hoofdstukken 6 en 7 werd de capaciteit van de pyrolyse- en vergassingsinstallatie uitgedrukt in het aantal megawatt geproduceerde elektriciteit. Bij een WKK-installatie wordt er echter niet alleen elektriciteit maar ook warmte geproduceerd. Om de vergelijkbaarheid met hoofdstukken 6 en 7 te garanderen wordt de capaciteit van de WKK-installatie uitgedrukt in het aantal MW_e geproduceerde elektriciteit. Dit levert tabel 87 op voor vergassing en tabel 88 voor pyrolyse. Om het aantal benodigde hectare wilg te berekenen wordt het aantal ton biomassa uit de voorlaatste kolom gedeeld door de biomassaopbrengst per hectare. Voor wilg bedraagt deze opbrengst 9,6 ton droge stof per hectare.

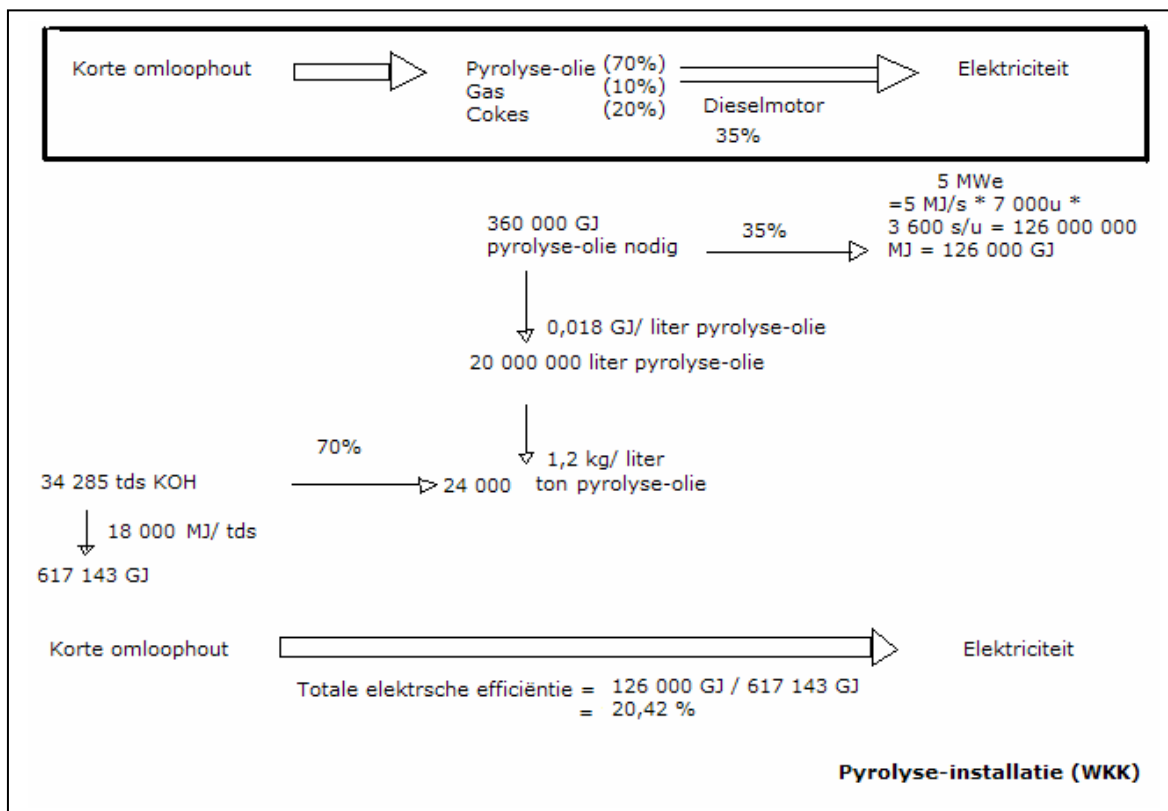
MW_e	MW_{th}	$MW_e + MW_{th}$	Input (MW)	ton biomassa (tds)	ha wilg
5	8	13	20	28 000 ¹	2 917
10	16	26	40	56 000	5 833
20	32	52	80	112 000	11 667
30	48	78	120	168 000	17 500
40	64	104	160	224 000	23 333
50	80	130	200	280 000	29 167

Tabel 87: omzettingstabel WKK vergassing

¹ $M = (5 MW_e * 3 600 * 7 000) / (0,25 * 18 000) = 28 000$ ton droge stof/ jaar (Caputo *et al.*, 2005)

Bij pyrolyse wordt er net zoals in paragraaf 6.2.2.2 in twee fasen gewerkt bij de berekening van de elektrische efficiëntie. Ter illustratie wordt de afleiding van de elektrische efficiëntie bij een WKK-installatie bij pyrolyse met een capaciteit van 5 MW_e beschreven. Een capaciteit van 5 MW_e bij 7 000 operationele uren per jaar komt overeen met 126 000 GJ. Bij Thewys en Kuppens (2008) vindt men voor een WKK-dieselmotor een elektrische efficiëntie van 35% terug. Om 5 MW elektriciteit te genereren is er dus 360 000 GJ pyrolyse-olie nodig. Dit komt overeen met 20 000 000 liter olie aangezien de energiedichtheid van de pyrolyse-olie 0,018 GJ per liter bedraagt. De dichtheid van de pyrolyse-olie is 1,2 kg per liter. Er is dus 24 000 ton pyrolyse-olie nodig om een elektriciteitsoutput van 5 MW_e te realiseren. Tijdens de eerste fase van het

pyrolyseproces wordt 70% van het aangevoerde korte omloophout omgezet in pyrolyse-olie. Er dient dus 34 286 ton droge stof korte omloophout aangevoerd te worden om 24 000 ton pyrolyse-olie en dus ook een elektrische output van 5 MW_e te realiseren. Aangezien de onderste verbrandingswaarde van hout 18 000 megajoule per ton droge stof bedraagt omvat 34 286 ton korte omloophout 617 143 GJ energie. De totale elektrische efficiëntie van dit pyrolyseproces is dus 20,42%. De schematische voorstelling van deze afleiding is terug te vinden in onderstaande figuur.



Figuur 16: schematische voorstelling pyrolyse-installatie (WKK)

Aangezien de thermische efficiëntie van pyrolyse-olie naar warmte 50% bedraagt, wordt er bij een elektrisch vermogen van 5 MW_e 180 000 GJ warmte geproduceerd. Bij 7 000 operationele uren komt dit overeen met 7,14 MW_{th}.

MW _e	MW _{th}	MW _e + MW _{th}	ton biomassa (tds)	ha wilg
5	7,14	12,14	34 286	3 571
10	14,29	24,29	68 571	7 143
20	25,57	45,57	137 143	14 286

30	42,86	52,86	205 714	21 429
40	57,14	97,14	274 286	28 571
50	71,43	121,43	342 857	35 714

Tabel 88: omzettingstabel WKK pyrolyse

¹ $M = (5 \text{ MW}_e * 3\,600 * 7\,000) / (0,2042 * 18\,000) = 34\,286 \text{ ton droge stof/ jaar}$
(Caputo *et al.*, 2005)

8.2 District heating

De geproduceerde warmte kan als proceswarmte binnen de pyrolyse- of vergassingsinstallatie worden aangewend of kan geleverd worden aan de omgeving, bijvoorbeeld aan omliggende residentiële, publieke of commerciële gebouwen. In deze studie wordt verondersteld dat de geproduceerde warmte volledig wordt geleverd aan de omgeving. In dit geval is er sprake van 'district heating'. (International Energy Agency, 2008) De vraag naar warmte en de verdelingskosten van warmte zijn afhankelijk van het gebied waarin de warmte wordt geproduceerd. Wij gaan uit van een residentieel gebied met vooral open bebouwing en ook enkele appartementsgebouwen. Een dergelijk gebied kent een gemiddelde vraag naar warmte en een gemiddelde verdelingskost van de geproduceerde warmte. De geproduceerde warmte wordt aangewend om de gebouwen in dit gebied te voorzien van ruimteverwarming tot maximum 100°C. (Dornburg en Faaij, 2001) In paragrafen 8.3.2 en 8.3.3 wordt de extra investeringskost ten gevolge van de distributie van de geproduceerde thermische energie berekend. Deze berekening gebeurt aan de hand van onderstaande formule.

$$S_d Q' = \frac{2}{3} Q^{1,5} (D_h h_h \eta)^{-0,5} \quad (\text{Dornburg en Faaij, 2001}) \quad (31)$$

met:

- $S_d Q'$ = gemiddelde hoeveelheid verdeelde warmte en afstand voor distributie (MJ km/ jaar)
- Q = hoeveelheid verdeelde warmte (MJ/ jaar)
- D_h = dichtheid van warmtevraag ($\text{MW}_{th}/ \text{km}^2$)
- h_h = operationele tijd (sec/ jaar)

De operationele tijd h_h bedraagt 7 000 uur per jaar. Dit komt overeen met 25 200 000 seconden per jaar. De dichtheid van de warmtevraag D_h voor een residentieel gebied is

2,2 MW_{th} per km². (Dornburg en Faaij, 2001) Een gezin verbruikt gemiddeld 20 000 kWh warmte-energie per jaar. (Junior Chamber International) Volgens VREG (2007) is het jaarlijkse warmte-energieverbruik per gezin 20 934 kWh. De bevolkingsdichtheid in Vlaanderen is 450 inwoners/ km². (Algemene Directe Statistiek en Economische Informatie, 2006) In het jaar 2005 bedroeg het aantal inwoners per gezin in Vlaanderen 2,38. (Vandaele, 2007) In Vlaanderen wonen er dus gemiddeld 189 gezinnen per km². Bij een warmteverbruik van 20 000 kWh per gezin is de dichtheid van de warmtevraag dus 3 780 MWh per km². Een jaar bestaat uit 8 760 uren. De dichtheid van de warmtevraag is dus 0,43 MW_{th} per km². Deze waarde ligt een stuk lager dan de waarde die we bij Dornburg en Faaij (2001) terugvinden. Het betreft hier echter de gemiddelde dichtheid van de warmtevraag voor Vlaanderen en niet de dichtheid van een residentieel gebied.

8.3 De initiële investering WKK

8.3.1 Indeling totale investeringskosten WKK

De investeringskost van een WKK-installatie is afhankelijk van de conversietechniek die wordt toegepast en van de grootte van de installatie. (Coenen *et al.*, 2008)

De investeringskost kan ingedeeld worden in volgende componenten:

- Biomassa
 - toevoer systeem
 - opslag (b.v. tank met opstartbrandstof)
 - voorbehandeling systeem (b.v. droger)
- 'Afval' (digestaat, as)
 - afvoer systeem
 - opslag
- Installaties
 - conversie (b.v. verbrandingsketel met stoomturbine)
 - WKK
 - transport, montage en aansluiting
- Warmte en koude
 - warmteverdeler

- warmtebuffer
- rookgascondensor
- noodkoeling
- Emissies
 - ontwaveling
 - teerverwijdering
 - katalysator (NO_x, onverbrand)
 - roetfilter (fijn stof)
 - ureumtank (NO_x)
- Gas
 - Opslag
 - CO₂ reinigingsinstallatie
- Civiel
 - fundering/ heien
 - lekbakvoorziening
 - gebouwen, doorvoeren, afvoeren
 - grond
- Veiligheid/ Milieu
 - geluidsdempende maatregelen (b.v. omkasting)
 - besturing en telemetrie (besturing op afstand)
 - fakkel/ afblaasinrichting (bij stookgas)
- Elektrisch:
 - transformator
 - gebouw
 - netaansluiting
 - synchronisatie

(Coenen *et al.*, 2008)

Cogen Vlaanderen (2006) deelt de totale investeringskosten voor een WKK-installatie in in uitrustingskosten, installatiekosten en projectkosten. De belangrijkste componenten van de uitrustingskosten zijn de kosten voor het motorblok en de generator, het warmterecuperatiesysteem, bijstook, het uitlaatgassysteem, elektronica en automatisering, de brandstofvoer, de elektrische aansluiting, de thermische aansluiting, de ventilatie- en verbrandingsluchtsystemen, de geluidsomkasting en de vervoerskosten. De installatiekosten bestaan uit installatievergunningen, de aankoop, de

sanering en de voorbereiding van het terrein, de constructie en bouw van de uitrusting, bouwkundige kosten voor gebouwen, funderingen en wegen, documentatie en bouwtekeningen. Tenslotte zijn er nog de projectkosten. Deze maken ongeveer 15 - 30% uit van de totale investeringskost. De projectkosten omvatten onder andere de kosten van het ontwerp, de kosten voor het beheer van het project, verzekering van de risico's, kosten voor milieustudies en milieuvergunningen, kosten voor keuringen en inspecties, wettelijke kosten en opleidingskosten. Verder wordt er nog aanbevolen om rekening te houden met onvoorziene kosten, de zogenaamde 'contingency' kosten.

8.3.2 Totale investeringskosten WKK vergassing

Om de totale investeringskosten van een WKK-installatie bij vergassing te bepalen worden de totale kosten van de warmteverdeling opgeteld bij de totale investeringskosten aan de hand van de indeling van Caputo *et al.* (2005). De berekeningen gebeuren op dezelfde manier als in paragraaf 7.1.1, maar gaan uit van een elektrische efficiëntie van 25% in plaats van de efficiënties die in paragraaf 6.2.2.1 vermeld worden.

In onderstaande tabel wordt de thermische output in MWh_e per jaar omgezet in de thermische output in MJ per jaar. De derde kolom bekomen we door de tweede kolom te vermenigvuldigen met 3 600, want 1 MWh is gelijk aan 3 600 MJ.

Vermogen vergassingsinstallatie (MW _e)	Q geproduceerd (MWh _e / jaar)	Q geproduceerd (MJ/ jaar)
5	56 000	201 600 000
10	112 000	403 200 000
20	224 000	806 400 000
30	336 000	1 209 600 000
40	448 000	1 612 800 000
50	560 000	2 016 000 000

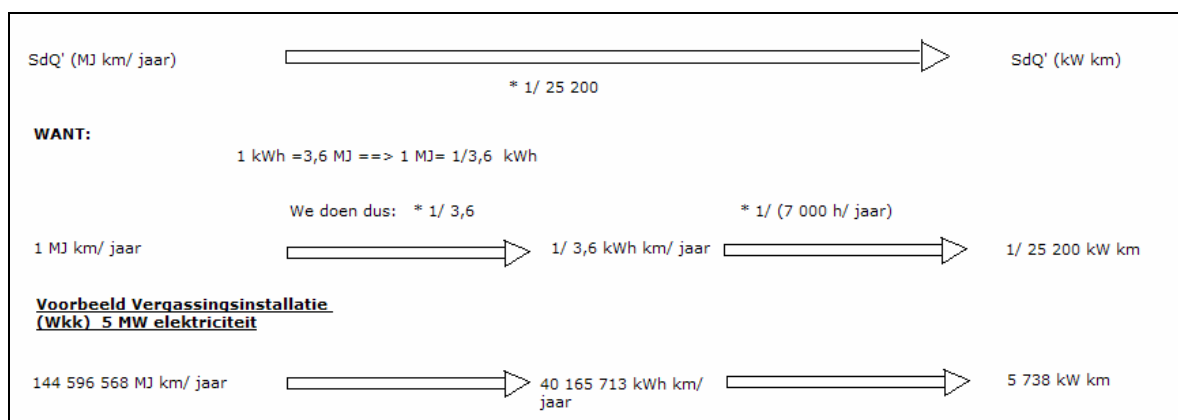
Tabel 89: thermische output uitgedrukt in megajoule per jaar bij vergassing

Volgens van Stijn (2008) is het erg onrealistisch om aan te nemen dat men alle geproduceerde warmte verkocht krijgt. Tijdens de zomermaanden zal de vraag naar warmte immers veel lager liggen dan tijdens de wintermaanden. Voorlopig wordt er in deze studie toch van uit gegaan dat alle geproduceerde warmte verkocht wordt. In hoofdstuk 10 wordt er onderzocht wat het effect op de netto contante waarde is wanneer er minder warmte kan afgezet worden. De tweede kolom in tabel 90 verkrijgt men door

de waarde Q in te vullen in te vullen in formule (31) bij een D_h die gelijk is aan $2,2 \text{ MW}_{th} / \text{km}^2$ en een h_h die gelijk is aan $25\,200\,000 \text{ sec/ jaar}$. Door de gemiddelde hoeveelheid verdeelde warmte en afstand voor distributie in MJ km per jaar te delen door 25 200 verkrijgt men de gemiddelde hoeveelheid verdeelde warmte en afstand voor distributie in kW km. De reden waarom we delen door 25 200 wordt uitgelegd in figuur 17.

Q verdeeld (MJ/ jaar)	S_dQ' (MJ km/ jaar)	S_dQ' (kW km)
201 600 000	144 596 568	5 738
403 200 000	408 980 855	16 229
806 400 000	1 156 772 545	45 904
1 209 600 000	2 125 126 863	84 330
1 612 800 000	3 271 846 843	129 835
2 016 000 000	4 572 544 971	181 450

Tabel 90: gemiddelde hoeveelheid verdeelde warmte en distributie bij vergassing



Figuur 17: omzetting van MJ km/ jaar naar kW km

Met behulp van formule (31) wordt S_dQ' , de gemiddelde hoeveelheid verdeelde warmte en afstand voor distributie, berekend. Op basis hiervan wordt de totale kost van warmteverdeling voor de vergassingsinstallatie bepaald. De specifieke kosten van warmteverdeling bedragen 64,8 EUR/ (kW km). (Dornburg en Faaij, 2001)

S_dQ' (kW km/ jaar)	Totale kosten warmteverdeling (EUR)
5 738	371 820
16 229	1 051 665
45 904	2 974 558
84 330	5 464 612

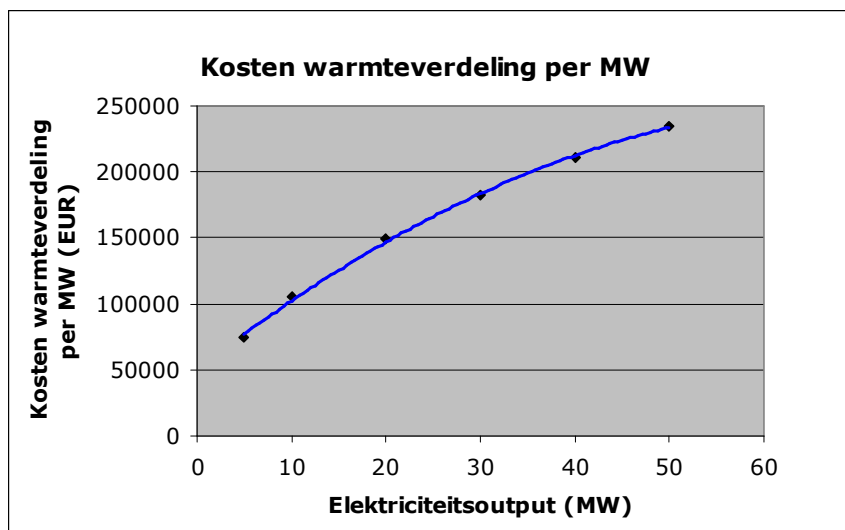
129 835	8 413 320
181 450	11 757 973

Tabel 91: berekening totale kosten van warmteverdeling bij vergassing

Intuïtief zou men verwachten dat de kosten van warmteverdeling per MW_e zouden dalen naarmate de elektriciteitsoutput toeneemt, maar uit tabel 92 en figuur 18 blijkt dat de kosten van de warmteverdeling per MW_e stijgen naarmate het vermogen van de vergassingsinstallatie toeneemt. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat men bij grote vermogens niet alle warmte afgezet krijgt in de nabije omgeving. Hierdoor dient men een deel van de geproduceerde warmte in verder gelegen gebieden af te zetten. Het gevolg hiervan zijn hogere kosten.

Vermogen vergassingsinstallatie (MW_e)	Kosten warmteverdeling per MW_e (EUR)
5	74 364
10	105 167
20	148 728
30	182 154
40	210 333
50	235 159

Tabel 92: kosten warmteverdeling per MW_e bij vergassing



Figuur 18: kosten warmteverdeling per MW_e bij vergassing

In onderstaande tabel worden de eigen berekeningen van de totale investeringskosten aan de hand van de indeling van Caputo *et al.* (2005) en de formules van Bridgwater *et al.* (2002) weergegeven. Zoals reeds vermeld wordt er bij deze berekeningen een

elektrische efficiëntie van 25% verondersteld. Hierdoor stijgt $M_{G/CC}$ waardoor de totale investeringskosten toenemen.

Vermogen vergassingsinstallatie (MW_e)	Eigen berekeningen (EUR) adhv Caputo et al. (2005)	Eigen berekeningen (EUR) adhv Bridgwater et al. (2002)
5	25 836 310	22 173 551
10	41 496 104	37 502 770
20	68 006 254	63 598 966
30	91 597 430	86 731 704
40	113 572 656	108 147 136
50	134 463 969	128 378 850

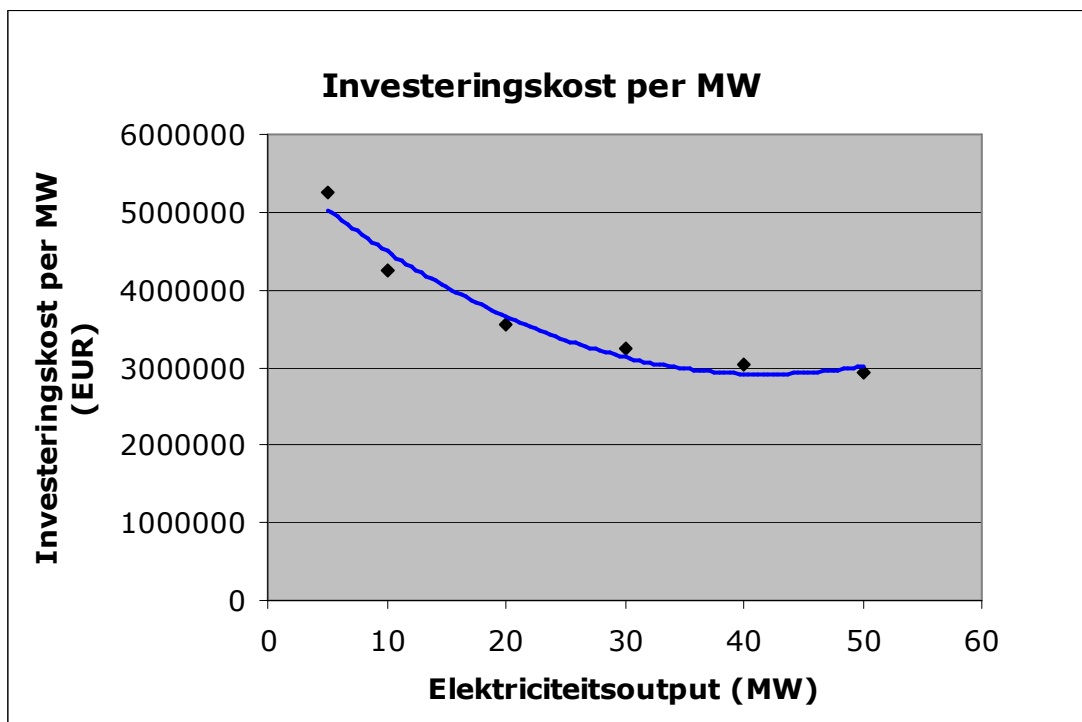
Tabel 93: totale investeringskosten exclusief warmteverdeling bij vergassing

Net zoals in paragraaf 7.1.1 verkiezen we om verder te werken met de berekeningen aan de hand van de indeling van Caputo *et al.* (2005). In onderstaande tabel worden de totale investeringskosten voor de warmtekrachtkoppeling berekend.

Vermogen vergassingsinstallatie (MW_e)	Eigen berekeningen (EUR) adhv Caputo et al. (2005)	Totale kosten warmteverdeling (EUR)	Totale investeringskosten WKK vergassing (EUR)
5	25 836 310	371 820	26 208 130
10	41 496 104	1 051 665	42 547 769
20	68 006 254	2 974 558	70 980 812
30	91 597 430	5 464 612	97 062 042
40	113 572 656	8 413 320	121 985 976
50	134 463 969	11 757 973	146 221 942

Tabel 94: totale investeringskosten WKK vergassing

In onderstaande figuur wordt de investeringskost per MW_e van de WKK-installatie bij vergassing uitgezet in functie van de elektriciteitsoutput.



Figuur 19: investeringskost WKK per MW_e in functie van elektriciteitsoutput bij vergassing

Ondanks dat de kosten van de warmteverdeling per MW_e groter worden naarmate de elektriciteitsoutput stijgt (zie figuur 18) doen er zich toch schaalvoordelen voor bij de totale investeringskosten van de warmtekrachtkoppeling.

8.3.3 Totale investeringskosten WKK pyrolyse

Uit de formules (15) en (16) die vermeld worden in paragraaf 7.1.2 blijkt dat de investeringskosten van het eigenlijke pyrolyseproces en de totale opslagkosten van de pyrolyse-olie afhankelijk zijn van de totale elektrische efficiëntie. Bij gescheiden productie van elektriciteit bedroeg deze totale elektrische efficiëntie 26,25%. In figuur 16 hebben we afgeleid dat de totale elektrische efficiëntie bij een WKK-installatie bij pyrolyse 20,42% is. De investeringskosten van de dieselmotor worden berekend met behulp van formule (17). Hierbij wordt α_e op basis van gegevens van Thewys en Kuppens (2008) gelijkgesteld aan 35% in plaats van de 45% die verondersteld wordt bij de gescheiden opwekking van elektriciteit.

Vermogen pyrolyse-installatie (MW _e)	Totale investeringskosten eigenlijke pyrolyseproces (EUR)	Totale opslagkosten pyrolyse-olie (EUR)	Totale investeringskosten dieselmotor (EUR)
5	7 877 123	195 918	4 568 004
10	12 101 121	259 322	7 850 931
20	18 584 304	343 146	13 487 851
30	23 892 577	404 343	18 517 425
40	28 549 879	454 265	23 181 284
50	32 783 687	497 190	27 598 655

Tabel 95: totale investeringskosten exclusief warmteverdeling bij pyrolyse

Om tot de totale investeringskosten van de WKK-installatie bij pyrolyse te komen worden de kosten van de warmteverdeling opgeteld bij de totale investeringskosten van het pyrolyseproces.

In onderstaande tabel wordt de thermische output in MWh_e per jaar omgezet in de thermische output in MJ per jaar.

Vermogen pyrolyse-installatie (MW _e)	Q geproduceerd (MWh _e / jaar)	Q geproduceerd (MJ/ jaar)
5	49 980	179 928 000
10	100 030	360 108 000
20	178 990	644 364 000
30	300 020	1 080 072 000
40	399 980	1 439 928 000
50	500 010	1 800 036 000

Tabel 96: thermische output uitgedrukt in megajoule per jaar bij pyrolyse

Ook bij pyrolyse wordt er van uit gegaan dat de geproduceerde warmte volledig verdeeld wordt.

Q verdeeld (MJ/ jaar)	S _d Q' (MJ km/ jaar)	S _d Q' (kW km/ jaar)
179 928 000	121 918 700	4 838
360 108 000	345 200 446	13 698
644 364 000	826 264 506	32 788
1 080 072 000	1 793 086 559	71 154
1 439 928 000	2 760 154 288	109 530
1 800 036 000	3 857 837 942	153 089

Tabel 97: gemiddelde hoeveelheid verdeelde warmte en distributie bij pyrolyse

Bij de berekening van de totale kosten van warmteverdeling aan de hand van formule (31) bij een pyrolyse-installatie wordt een specifieke kost van warmteverdeling van 64,8 EUR/ (kW km) aangenomen. De totale kosten van de warmteverdeling bij pyrolyse worden uitgezet in tabel 98.

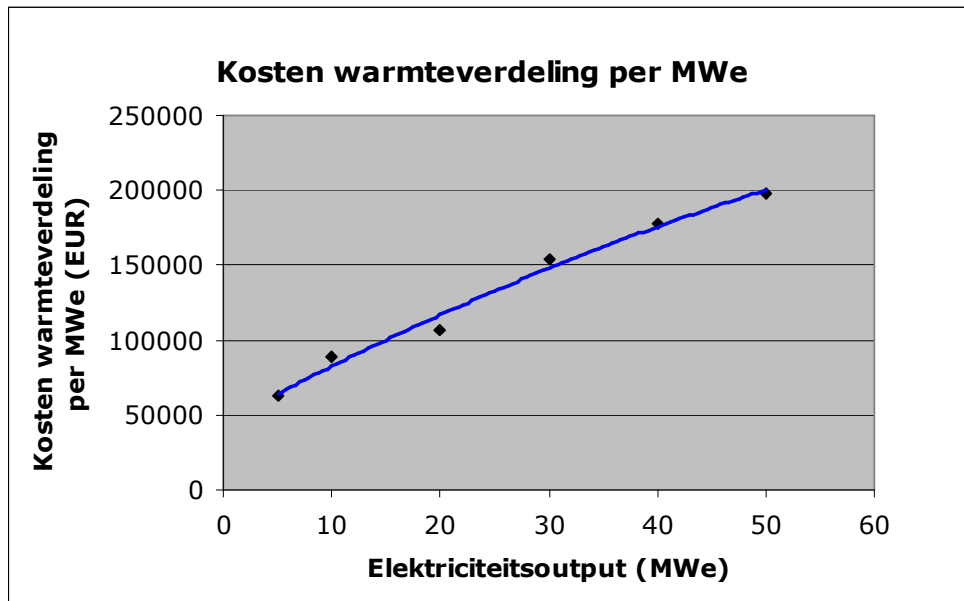
S_dQ' (kW km/ jaar)	Totale kosten warmteverdeling (EUR)
4 838	313 505
13 698	887 658
32 788	2 124 680
71 154	4 610 794
109 530	7 097 540
153 089	9 920 155

Tabel 98: berekening totale kosten van warmteverdeling bij pyrolyse

Tabel 99 geeft de kosten van de warmteverdeling per MW_e weer.

Vermogen vergassingsinstallatie (MW_e)	Kosten warmteverdeling per MW_e (EUR)
5	62 701
10	88 766
20	106 234
30	153 693
40	177 439
50	198 403

Tabel 99: kosten warmteverdeling per MW_e bij pyrolyse



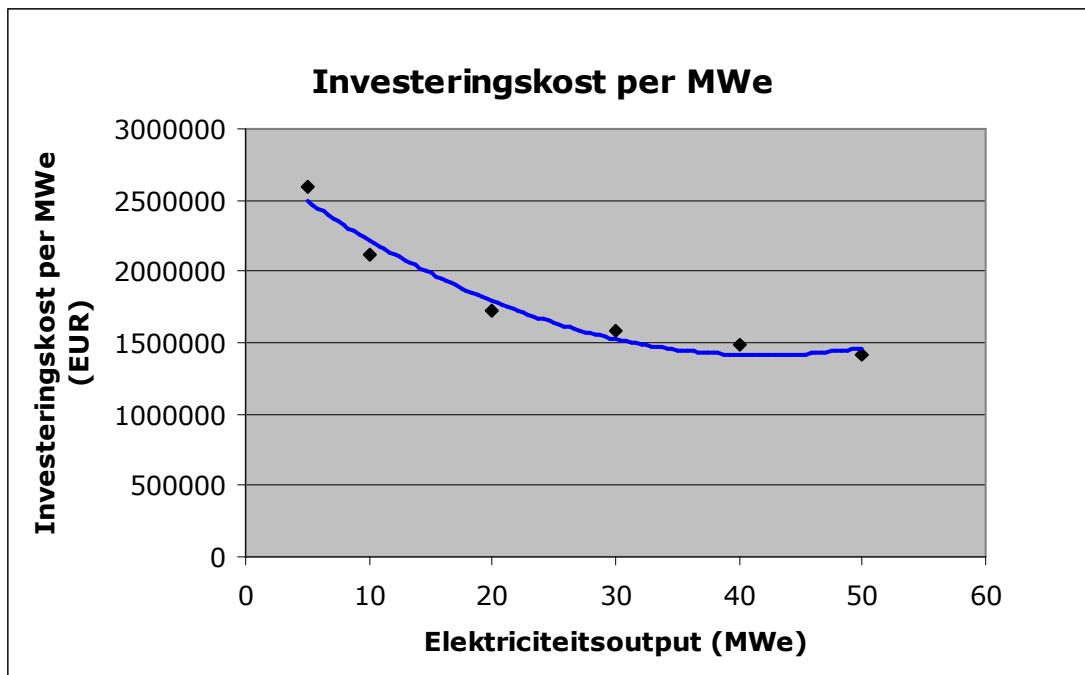
Figuur 20: kosten warmteverdeling per MWe bij pyrolyse

Net zoals bij vergassing stijgen de kosten van warmteverdeling per MWe naarmate het vermogen van de installatie toeneemt.

Tabel 100 geeft de totale investeringskosten van de WKK-installatie bij pyrolyse voor de verschillende capaciteiten weer.

Vermogen vergassingsinstallatie (MWe)	Totale investeringskosten pyrolyse (EUR)	Totale kosten warmteverdeling (EUR)	Totale investeringskosten WKK pyrolyse (EUR)
5	12 641 045	313 505	12 954 550
10	20 211 374	887 658	21 099 032
20	32 415 301	2 124 680	34 539 981
30	42 814 345	4 610 794	47 425 095
40	52 185 428	7 097 540	59 282 968
50	60 879 532	9 920 155	70 799 687

Tabel 100: totale investeringskosten WKK pyrolyse



Figuur 21: investeringskost WKK per MW_e in functie van elektriciteitsoutput bij pyrolyse

Ondanks dat de kosten van de warmteverdeling per MW_e groter worden naarmate de elektriciteitsoutput stijgt (zie figuur 20) doen er zich toch schaalvoordelen voor bij de totale investeringskosten van de warmtekrachtkoppeling.

8.3.4 Ecologiepremie

De technieken 'Productie van energie (WKK/ elektriciteit) op basis van de vergassing van biomassa' en 'Productie van energie (WKK/ elektriciteit) op basis van de pyrolyse van biomassa' maken beiden deel uit van de voor de ecologiepremie in aanmerking komende technologieën. De productie van elektriciteit en warmte met behulp van een WKK-installatie behoren bij de berekening van deze premie dus tot dezelfde technologie als de gescheiden productie van elektriciteit, zoals deze eerder bestudeerd werd. Voor de WKK-installaties wordt dus zowel voor vergassing als voor pyrolyse dezelfde performantiefactor van 46% en hetzelfde meerkostpercentage van 50% gehanteerd als in paragraaf 7.1.3. Ook de essentiële investeringscomponenten blijven hetzelfde.

8.3.4.1 Ecologiepremie vergassing

De componenten die in aanmerking komen voor de ecologiepremie zijn weergegeven in onderstaande tabel. De ecologiepremie wordt hier berekend voor een vergassingsinstallatie met een vermogen van 5 MW_e. In tabel 102 wordt deze premie ook berekend voor installaties met een vermogen van 10 tot 50 MW_e.

Essentiële investeringscomponenten	Kostprijs (EUR)	Subsidie-percentage	Meerkost-percentage	Ecologie-premie (EUR)
Opwekken van elektriciteit	6 962 488	40%	50%	1 392 498
Rookbehandeling	1 144 070	40%	50%	228 814
Pijpleidingkosten	751 360	40%	50%	150 272
Elektriciteitskosten	1 984 143	40%	50%	396 829
Instrumentatie en controle	1 078 785	40%	50%	215 757
Totale ecologiepremie (EUR)				2 384 170 → 1 750 000

Tabel 101: berekening ecologiepremie bij WKK vergassing

De ecologiepremie is echter beperkt tot een maximum van 1 750 000 EUR.

Vermogen vergassingsinstallatie (MW_e)	Totale kostprijs essentiële investeringscomponenten (EUR)	Ecologiepremie (EUR)
5	11 920 846	1 750 000
10	19 664 583	1 750 000
20	33 041 268	1 750 000
30	45 109 607	1 750 000
40	56 441 996	1 750 000
50	67 275 561	1 750 000

Tabel 102: ecologiepremie bij WKK vergassing

De maximumpremie van 1 750 000 EUR van de ecologiepremie wordt al bereikt bij een vermogen van 5 MW_e.

8.3.4.2 Ecologiepremie pyrolyse

De ecologiepremie wordt op dezelfde manier berekend als in paragraaf 7.1.3.2, namelijk door vergelijking met de conversietechnieken vergassing en verbranding.

Vermogen installatie (MW_e)	Percentage essentiële investeringscomponenten tov totale investeringskosten WKK verbranding (Ceunen, 2008)	Percentage essentiële investeringscomponenten tov totale investeringskosten WKK vergassing
5	49,17	45,49
10	48,74	46,22
20	47,88	46,55
30	/	46,48
40	/	46,27
50	46,02	46,01

Tabel 103: essentiële investeringscomponenten WKK verbranding en vergassing bij ecologiepremie

We kiezen ervoor om bij pyrolyse een percentage te gebruiken dat het gemiddelde is van het percentage van verbranding en vergassing. Dit percentage wordt weergegeven in tabel 104. Voor een vermogen van 30 en 40 MW_e hebben we geen gegevens ter beschikking voor verbranding. Voor deze vermogens wordt een percentage geschat op basis van de percentages van de andere vermogens.

Vermogen installatie (MW_e)	Percentage essentiële investeringscomponenten tov totale investeringskosten pyrolyse
5	47,33
10	47,48
20	47,22
30	46,82
40	46,42
50	46,02

Tabel 104: essentiële investeringscomponenten WKK pyrolyse bij ecologiepremie

In tabel 105 wordt de ecologiepremie berekend voor de verschillende vermogens van de pyrolyse-installatie .

Vermogen pyrolyse-installatie (MW_e)	Totale kostprijs essentiële investeringscomponenten (EUR)	Ecologiepremie (EUR)
5	6 131 389	1 226 278
10	10 017 820	1 750 000
20	16 309 779	1 750 000
30	22 204 429	1 750 000

40	27 519 154	1 750 000
50	32 582 016	1 750 000

Tabel 105: ecologiepremie WKK pyrolyse

Uit deze tabel stellen we vast dat vanaf een vermogen van 10 MW_e de maximumpremie van 1 750 000 EUR per investeringsproject wordt bereikt.

8.3.5 Investeringsaftrek

WKK-installaties zijn opgenomen in categorie 7 van de investeringen die in aanmerking komen voor deze aftrek. Een investering komt echter enkel in aanmerking wanneer deze voldoet aan enkele voorwaarden:

$$1) a_E + 2/3 a_Q \geq 50\% \quad (32)$$

$$2) (a_E) / (a_E + a_Q) \geq 25\% \quad (33)$$

$$3) (a_Q) / (a_E + a_Q) \geq 25\% \quad (34)$$

met:

- a_E : de verhouding van de op jaarbasis geproduceerde mechanische of elektrische energie en de totale aan het systeem op jaarbasis toegevoerde energie, berekend op de onderste verbrandingswaarde van de brandstof.

- a_Q : de verhouding van de op jaarbasis gebruikte warmte-energie en de totale aan het systeem op jaarbasis toegevoerde energie, berekend op de onderste verbrandingswaarde van de brandstof. (Biogas-E, 2007)

Deze voorwaarden garanderen dat de geproduceerde warmte voldoende wordt aangewend. (Vlaams Energieagentschap, 2007)

Toepassing van deze drie voorwaarden op een WKK-installatie voor vergassing geeft:

$$1) 0,25 + (2/3 * 0,40) = 51,67\% \geq 50\%$$

$$2) (0,25) / (0,25 + 0,40) = 38,46\% \geq 25\%$$

$$3) (0,40) / (0,25 + 0,40) = 61,54\% \geq 25\%$$

Toepassing van deze drie voorwaarden op een WKK–installatie voor pyrolyse geeft:

- 1) $0,2042 + (2/3 * 0,50) = 53,75\% \geq 50\%$
- 2) $(0,2042) / (0,2042 + 0,50) = 29,00\% \geq 25\%$
- 3) $(0,50) / (0,2042 + 0,50) = 71,00\% \geq 25\%$

Aangezien beide investeringen voldoen aan deze voorwaarden komen ze in aanmerking voor de verhoogde investeringsaftrek. Het is echter niet de volledige investering die in aanmerking komt voor de investeringsaftrek, maar enkel de onderstaande investeringscomponenten:

- installatie van krachtwerktuigen (gasturbines, diesel- en gasmotoren evenals stoomketels gecombineerd met tegendrukstoomturbines of aftapcondensatieturbines) waarin thermische energie wordt omgezet in mechanische energie;
- installatie van generatoren, met inbegrip van snelheidsreduktoren, waarin opgewekte mechanische energie wordt omgezet in elektrische energie;
- installatie van warmtewisselaars of recuperatieketels (met inbegrip van branders voor verhoging van de stoomproductie) die met uitlaatgassen werken;
- installatie van warmtewisselaars voor het terugwinnen van warmte van krachtwerktuigen;
- investeringen voor:
 - het opslaan van brandstof binnen de inrichting;
 - het transport van brandstoffen, verbrandingslucht, uitlaatgassen, koelwater, koellucht of ketelvoedingswater binnen de inrichting;
- installatie van:
 - geluidsisolatie;
 - rookgasreinigingsapparatuur;
 - apparatuur ter behandeling van ketelvoedingswater;
 - elektrische en elektronische apparatuur voor aansluiting op het interne elektriciteitsnet (Biogas-E, 2007)

Vergelijking van bovenstaande lijst met de indeling van de totale investeringskosten van Caputo *et al.* (2005) leert ons dat bij de vergassingsinstallatie enkel volgende kosten in aanmerking komen voor de verhoogde investeringsaftrek: de totale uitrustingskosten, de

pijpleidingkosten en de elektriciteitskosten. In onderstaande tabel wordt de verhoogde investeringsaftrek berekend bij een belastingsvoet van 33% en een investeringsaftrekpercentage van 15,5%.

Vermogen vergassingsinstallatie (MW_e)	In aanmerking komende investeringscomponenten (EUR)	Verhoogde investeringsaftrek (EUR)
5	13 523 354	691 720
10	22 112 923	1 131 076
20	36 761 060	1 880 328
30	49 845 866	2 569 554
40	62 054 883	3 174 107
50	73 672 302	3 768 338

Tabel 106: verhoogde investeringsaftrek bij WKK vergassing

De verhoogde investeringsaftrek voor de WKK-installatie bij pyrolyse wordt op dezelfde manier berekend als in paragraaf 7.1.4, namelijk door vergelijking met de conversietechnieken vergassing en verbranding.

Vermogen installatie (MW_e)	Percentage essentiële investeringscomponenten tov totale investeringskosten verbranding (Ceunen, 2008)	Percentage essentiële investeringscomponenten tov totale investeringskosten vergassing
5	48,02	51,60
10	47,78	51,97
20	47,15	51,79
30	/	51,35
40	/	50,87
50	45,70	50,38

Tabel 107: essentiële investeringscomponenten WKK verbranding en vergassing bij verhoogde investeringsaftrek

We kiezen ervoor om bij pyrolyse een percentage te gebruiken dat het gemiddelde is van het percentage van verbranding en vergassing. Dit percentage wordt weergegeven in tabel 108. Voor een vermogen van 30 en 40 MW_e hebben we geen gegevens beschikbaar voor verbranding. Voor deze vermogens hebben we een percentage geschat op basis van de percentages voor de andere vermogens.

Vermogen installatie (MW_e)	Percentage essentiële investeringscomponenten tov totale investeringskosten pyrolyse
5	49,81
10	49,88
20	49,47
30	48,99
40	48,52
50	48,04

Tabel 108: essentiële investeringscomponenten WKK pyrolyse bij verhoogde investeringsaftrek

In onderstaande tabel wordt de verhoogde investeringsaftrek berekend voor de verschillende vermogens van de pyrolyse-installatie. De belastingsvoet bedraagt ook hier 33% en het investeringsaftrekpercentage is 15,5%.

Vermogen pyrolyse-installatie (MW_e)	In aanmerking komende investeringscomponenten (EUR)	Verhoogde investeringsaftrek (EUR)
5	6 452 661	330 054
10	10 524 197	538 313
20	17 086 929	873 996
30	23 233 554	1 188 396
40	28 764 096	1 471 284
50	34 012 170	1 739 722

Tabel 109: verhoogde investeringsaftrek WKK pyrolyse

8.3.6 De initiële investering van vergassing

Om de initiële investering van de WKK-installatie bij vergassing te berekenen worden de ecologiepremie en de investeringsaftrek van de totale investeringskosten afgetrokken.

	5 MW_e	10 MW_e	20 MW_e	30 MW_e	40 MW_e	50 MW_e
Totale investeringskosten (EUR)	26 208 130	42 547 769	70 980 812	97 062 042	121 985 976	146 221 942
Ecologiepremie (EUR)	1 750 000	1 750 000	1 750 000	1 750 000	1 750 000	1 750 000
Investeringsaftrek (EUR)	691 720	1 131 076	1 880 328	2 569 554	3 174 107	3 768 338

Initiële investering (EUR)	23 766 410	39 666 693	67 350 484	92 742 488	117 061 869	140 703 604
----------------------------	------------	------------	------------	------------	-------------	-------------

Tabel 110: initiële investering WKK vergassing

8.3.7 De initiële investering van pyrolyse

De berekening van de initiële investering van pyrolyse gebeurt op dezelfde manier als bij vergassing.

	5 MW _e	10 MW _e	20 MW _e	30 MW _e	40 MW _e	50 MW _e
Totale investeringskosten (EUR)	12 954 550	21 099 032	34 539 981	47 425 095	59 282 968	70 799 687
Ecologiepremie (EUR)	1 226 278	1 750 000	1 750 000	1 750 000	1 750 000	1 750 000
Investeringsaftrek (EUR)	330 054	538 313	873 996	1 188 396	1 471 284	1 739 722
Initiële investering (EUR)	11 398 218	18 810 719	31 915 985	44 486 699	56 061 684	67 309 965

Tabel 111: initiële investering WKK pyrolyse

8.4 Operationele kosten WKK

De operationele kosten voor een WKK-systeem bestaan uit de volgende onderdelen:

- Personeelskosten (exclusief onderhoud):
 - Bediening installatie
 - Bewerking/ voeding biomassa
- Onderhoudskosten:
 - Personeel
 - Materiaal
 - Reservering groot onderhoud
- Biomassa/ 'afval':
 - Aankoop
 - Afvoer (digestaat en as)
- Energie:
 - Elektriciteit

- Warmte
- Aardgas
- Verzekering

(Coenen *et al.*, 2008)

8.4.1 Operationele kosten vergassing

Net zoals in paragraaf 7.2 worden de volgende operationele kosten berekend: onderhoudskosten, personeelskosten, verzekeringskosten, algemene overheadkosten, aanvoerkosten korte omloophout, transport- en behandelingskosten van de assen en energiekosten.

8.4.1.1 Onderhoudskosten

Volgens Coenen *et al.* (2008) is de onderhoudskost van een WKK-installatie 3% van de totale investeringskosten. Het gaat hier om de investeringskosten inclusief de extra kost voor de distributie van warmte. Tijdens deze analyse wordt een onderhoudskost van 3% aangenomen.

Vermogen vergassingsinstallatie (MW _e)	Totale investeringskosten (EUR)	Onderhoudskosten (EUR)
5	26 208 130	786 244
10	42 547 769	1 276 433
20	70 980 812	2 129 424
30	97 062 042	2 911 861
40	121 985 976	3 659 579
50	146 221 942	4 386 658

Tabel 112: onderhoudskosten WKK vergassing

8.4.1.2 Personeelskosten

De berekening van de personeelskosten gebeurt met behulp van formules (19), (20), (21) en (22). Uit onderstaande tabel blijkt dat de personeelskosten hoger liggen dan bij gescheiden opwekking van elektriciteit. De reden hiervoor is de lagere elektrische efficiëntie bij de warmtekrachtkoppeling. Hierdoor is er meer korte omloophout nodig om een bepaalde elektriciteitsoutput te genereren. Dit impliceert dan weer extra personeel.

Vermogen vergassingsinstallatie (MW_e)	Totaal aantal werknemers (met afronding)	Totale personeelskosten (EUR)
5	18	936 000
10	27	1 404 000
20	38	1 976 000
30	45	2 340 000
40	49	2 548 000
50	55	2 860 000

Tabel 113: personeelskosten WKK vergassing

8.4.1.3 Aanvoerkosten korte omloophout

De transportkost van het korte omloophout wordt op dezelfde manier berekend als in paragraaf 7.2.3. In onderstaande tabel wordt de aanvoerkost per ton droge stof wilg weergegeven.

Netto elektrische output W_{NE} (MW_e)	Aanvoerkost per ton droge stof wilg (EUR)
5	83
10	85
20	89
30	92
40	94
50	96

Tabel 114: aanvoerkost per ton droge stof wilg bij WKK vergassing

Tabel 115 geeft de totale aanvoerkosten korte omloophout weer voor de verschillende elektrische vermogens. De lagere elektrische efficiëntie bij de WKK, ten opzichte van de installatie waarin er enkel elektriciteit wordt opgewekt, heeft als gevolg dat er meer biomassa dient aangevoerd te worden dan in paragraaf 7.2.3. Hierdoor zijn de totale aanvoerkosten gestegen. Ook een toename van de aanvoerkost van het korte omloophout ten opzichte van tabel 53 draagt bij aan de toename van de totale aanvoerkosten.

Vermogen vergassingsinstallatie (MW_e)	Aantal ton biomassa (tds)	Totale Aanvoerkosten (EUR)
5	28 000	2 324 000
10	56 000	4 760 000
20	112 000	9 968 000

30	168 000	15 456 000
40	224 000	21 056 000
50	280 000	26 880 000

Tabel 115: totale aanvoerkosten korte omloophout bij WKK vergassing

8.4.1.4 Verzekeringskosten en algemene overheadkosten

De verzekeringskosten bedragen 0,25% tot 2% van de totale investeringskosten. (Cogen Vlaanderen, 2006) Er wordt geopteerd voor hetzelfde percentage als bij de gescheiden opwekking van enkel elektriciteit, namelijk 1%.

Vermogen vergassingsinstallatie (MW_e)	Totale investeringskosten (EUR)	Verzekeringskosten en algemene overheadkosten (EUR)
5	26 208 130	262 081
10	42 547 769	425 478
20	70 980 812	709 808
30	97 062 042	970 620
40	121 985 976	1 219 860
50	146 221 942	1 462 219

Tabel 116: verzekeringskosten en algemene overheadkosten bij WKK vergassing

8.4.1.5 Transport- en behandelingskosten van de assen

Voor de berekening van deze kosten wordt gebruik gemaakt van formules (25) en (26). Deze berekening levert ons volgende resultaten op.

Vermogen vergassingsinstallatie (MW_e)	Aantal ton biomassa (ton droge stof)	Aantal ton assen	Transportkosten assen (EUR)	Behandelingskosten assen (EUR)
5	28 000	560	34 720	13 440
10	56 000	1 120	69 440	26 880
20	112 000	2 240	138 880	53 760
30	168 000	3 360	208 320	80 640
40	224 000	4 480	277 760	107 520
50	280 000	5 600	347 200	134 400

Tabel 117: transport- en behandelingskosten van de assen bij WKK vergassing

8.4.1.6 Energiekosten

Net zoals in paragraaf 7.2.6 wordt de geproduceerde elektriciteit aangewend om het eigen proces van elektriciteit te voorzien. De totale kosten van het water worden berekend met een prijs van 1,50 EUR/ m³.

Vermogen vergassingsinstallatie (MW _e)	Vermogen vergassingsinstallatie (MWh)	Benodigde hoeveelheid water (ton)	Totale kosten water STEG-centrale bij WKK (EUR)
5	35 000	73 500	110 250
10	70 000	147 000	220 500
20	140 000	294 000	441 000
30	210 000	441 000	661 500
40	280 000	588 000	882 000
50	350 000	735 000	1 102 500

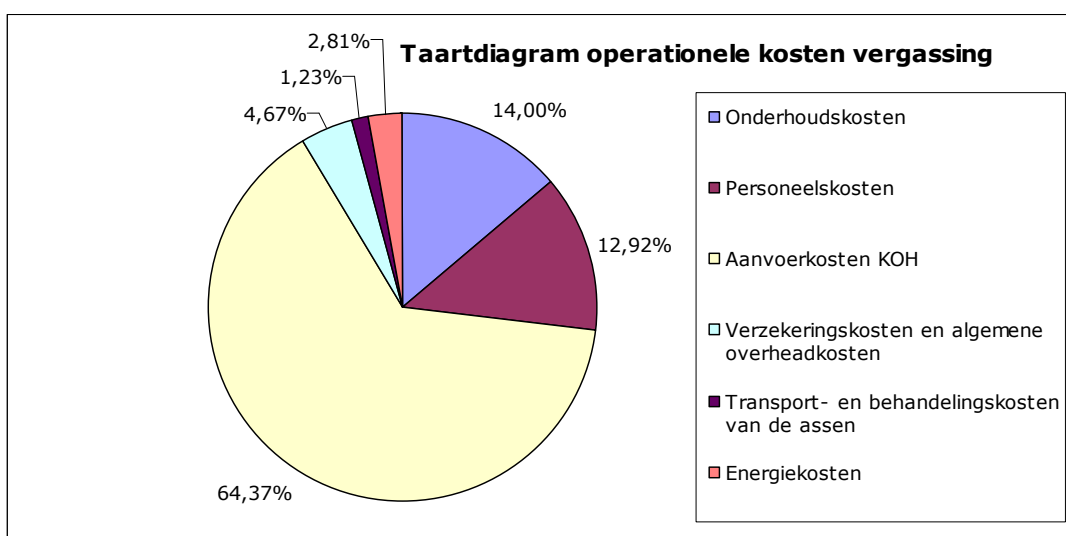
Tabel 118: totale kosten water STEG-centrale bij WKK

Tabel 119 geeft een overzicht van de jaarlijkse operationele kosten van een WKK bij vergassing voor een capaciteit van 5 tot 50 MW_e.

	5 MW _e	10 MW _e	20 MW _e	30 MW _e	40 MW _e	50 MW _e
Onderhoudskosten	786 244	1 276 433	2 129 424	2 911 861	3 659 579	4 386 658
Personeelskosten	936 000	1 404 000	1 976 000	2 340 000	2 548 000	2 860 000
Aanvoerkosten KOH	2 324 000	4 760 000	9 968 000	15 456 000	21 056 000	26 880 000
Verzekeringskosten en algemene overheadkosten	262 081	425 478	709 808	970 620	1 219 860	1 462 219
Transport- en behandelingskosten van de assen	48 160	96 320	192 640	288 960	385 280	481 600
Energiekosten	110 250	220 500	441 000	661 500	882 000	1 102 500
Totale jaarlijkse operationele kosten vergassing	4 466 735	8 182 731	15 416 872	22 628 941	29 750 719	37 172 977

Tabel 119: totale jaarlijkse operationele kosten WKK bij vergassing

In onderstaande figuur wordt de relatieve bijdrage van de verschillende kostencategorieën aan de totale operationele kosten weergegeven. De berekeningen zijn gebeurd op basis van het gemiddelde over de verschillende vermogens. Net zoals bij een investering in een vergassingsinstallatie waarin er enkel elektriciteit wordt opgewekt blijven de aanvoerkosten van het korte omloophout veruit de grootste kostencategorie. Het aandeel van deze aanvoerkosten is gestegen ten opzichte van figuur 12. De voornaamste reden hiervoor is de lagere elektrische efficiëntie waardoor er meer korte omloophout dient aangevoerd te worden om een bepaalde elektriciteitsoutput te genereren.



Figuur 22: taartdiagram jaarlijkse operationele kosten WKK bij vergassing

In onderstaande tabel wordt het aandeel van de initiële investeringskost in de totale kosten weergegeven voor de verschillende capaciteiten. Onder de totale kosten verstaan we de totale operationele kosten gedurende 20 jaar en de initiële investeringskost.

Vermogen vergassingsinstallatie (MW _e)	Aandeel initiële investering in totale kosten (%)
5	32,91
10	30,89
20	28,71
30	27,43
40	26,62
50	25,87

Tabel 120: aandeel initiële investering in totale kosten bij WKK vergassing

Net zoals bij gescheiden productie van elektriciteit stellen we een daling van het aandeel vast naarmate het vermogen van de installatie toeneemt. De reden hiervoor is dat het schaalvoordeel van de initiële investeringkost, ondanks de meer dan proportionele toename van de kosten voor de warmteverdeling, groter is dan het schaalvoordeel van de operationele kosten.

8.4.2 Operationele kosten pyrolyse

De operationele kosten die besproken worden zijn de onderhoudskosten, de personeelskosten, de aanvoerkosten van het korte omloophout, de verzekeringskosten, de algemene overheadkosten, de verwerkingskosten van de cokes en de energiekosten.

8.4.2.1 Onderhoudskosten

Net zoals bij de gescheiden productie van elektriciteit wordt een onderhoudskost van 3% van de totale investeringkosten aangenomen.

Vermogen pyrolyse-installatie (MW_e)	Totale investeringskosten (EUR)	Onderhoudskosten (EUR)
5	12 954 550	388 637
10	21 099 032	632 971
20	34 539 981	1 036 199
30	47 425 095	1 422 753
40	59 282 968	1 778 489
50	70 799 687	2 123 991

Tabel 121: onderhoudskosten WKK pyrolyse

8.4.2.2 Personeelskosten

Bij de berekening van de personeelskosten wordt gebruik gemaakt van formules (28) en (29) met een gemiddelde personeelskost per werknemer per jaar van 52 000 EUR.

De personeelskosten zijn gestegen ten opzichte van gescheiden opwekking van elektriciteit om dezelfde reden als bij vergassing.

Vermogen pyrolyse-installatie(MW _e)	Totaal aantal werknemers (met afronding)	Totale personeelskosten (EUR)
5	10	520 000
10	14	728 000
20	19	988 000
30	23	1 196 000
40	27	1 404 000
50	30	1 560 000

Tabel 122: personeelskosten WKK pyrolyse

8.4.2.3 Aanvoerkosten korte omloophout

De transportkost van het korte omloophout wordt op dezelfde manier berekend als in paragraaf 7.3.3. In onderstaande tabel wordt de aanvoerkost per ton droge stof wilg weergegeven.

Netto elektrische output W _{NE} (MW _e)	Aanvoerkost per ton droge stof wilg (EUR)
5	83
10	86
20	90
30	93
40	96
50	98

Tabel 123: aanvoerkost per ton droge stof wilg bij WKK pyrolyse

Tabel 124 geeft de totale aanvoerkosten korte omloophout (wilg) weer voor de verschillende elektrische vermogens. Door de lagere elektrische efficiëntie dient er meer biomassa aangevoerd te worden dan in paragraaf 7.3.3 waardoor de totale aanvoerkosten zijn gestegen. Ook een stijging van de aanvoerkost van het korte omloophout ten opzichte van tabel 69 bij een vermogen van 10 tot 50 MW_e draagt bij tot de hogere totale aanvoerkosten.

Vermogen pyrolyse-installatie (MW _e)	Aantal ton biomassa (tds)	Totale Aanvoerkosten (EUR)
5	34 286	2 845 738
10	68 571	5 897 106
20	137 143	12 342 870
30	205 714	19 131 402

40	274 286	26 331 456
50	342 857	33 599 986

Tabel 124: totale aanvoerkosten korte omloophout bij WKK pyrolyse

8.4.2.4 Verzekeringskosten

De verzekeringskosten bedragen 0,25% tot 2% van de totale investeringskosten. (Cogen Vlaanderen, 2006) In deze studie wordt een verzekeringskost van 2% verondersteld.

Vermogen pyrolyse-installatie (MW _e)	Totale investeringskosten (EUR)	Verzekeringskosten (EUR)
5	12 954 550	259 091
10	21 099 032	421 981
20	34 539 981	690 800
30	47 425 095	948 502
40	59 282 968	1 185 659
50	70 799 687	1 415 994

Tabel 125: verzekeringskosten WKK pyrolyse

8.4.2.5 Algemene overheadkosten

Bij de berekening van de algemene overheadkosten wordt hetzelfde percentage genomen als bij opwekking van enkel elektriciteit, namelijk 2,5%.

Vermogen pyrolyse-installatie (MW _e)	Totale investeringskosten (EUR)	Algemene overheadkosten (EUR)
5	12 954 550	323 864
10	21 099 032	527 476
20	34 539 981	863 500
30	47 425 095	1 185 627
40	59 282 968	1 482 074
50	70 799 687	1 769 992

Tabel 126: algemene overheadkosten WKK pyrolyse

8.4.2.6 Verwerkingskosten cokes

Voorlopig worden de verwerkingskosten van de cokes gelijkgesteld aan nul, aangezien de verwerkte biomassa niet met metalen vervuild is.

8.4.2.7 Energiekosten

Net zoals in paragraaf 7.3.7 worden de cokes en het niet-condenseerbare gas aangewend om het eigen proces van elektriciteit te voorzien. De prijs van het water is 1,50 EUR/ m³.

Vermogen pyrolyse-installatie (MW _e)	Aantal ton droge stof biomassa M (tds/ jaar)	Benodigde hoeveelheid water (m ³)	Totale kosten water WKK-installatie (EUR)
5	34 286	634 291	951 437
10	68 571	1 268 564	1 902 845
20	137 143	2 537 146	3 805 718
30	205 714	3 805 709	5 708 564
40	274 286	5 074 291	7 611 437
50	342 857	6 342 855	9 514 282

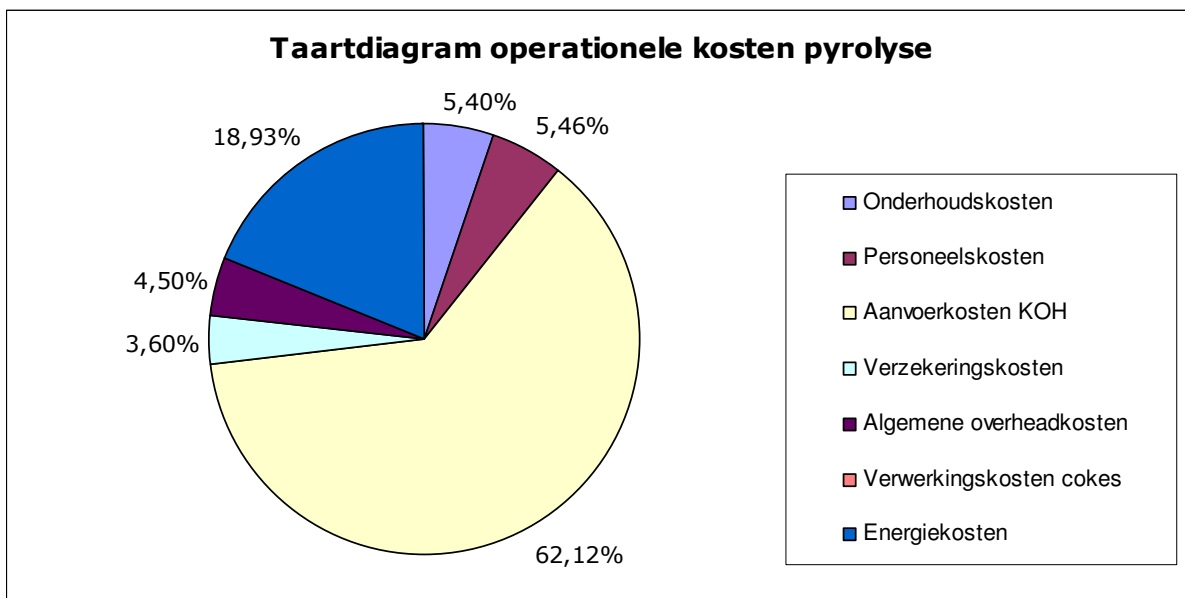
Tabel 127: totale kosten water bij WKK-installatie pyrolyse

In tabel 128 worden de jaarlijkse operationele kosten van een WKK bij pyrolyse voor een capaciteit van 5 tot 50 MW_e berekend.

	5 MW _e	10 MW _e	20 MW _e	30 MW _e	40 MW _e	50 MW _e
Onderhoudskosten	388 637	632 971	1 036 199	1 422 753	1 778 489	2 123 991
Personeelskosten	520 000	728 000	988 000	1 196 000	1 404 000	1 560 000
Aanvoerkosten KOH	2 845 738	5 897 106	12 342 870	19 131 402	26 331 456	33 599 986
Verzekeringsk.	259 091	421 981	690 800	948 502	1 185 659	1 415 994
Algemene overheadk.	323 864	527 476	863 500	1 185 627	1 482 074	1 769 992
Verwerkingskosten cokes	0	0	0	0	0	0
Energiekosten	951 437	1 902 845	3 805 718	5 708 564	7 611 437	9 514 282
Totale jaarlijkse operationele kosten pyrolyse	5 288 767	10 110 379	19 727 087	29 592 848	39 793 115	49 984 245

Tabel 128: totale jaarlijkse operationele kosten bij WKK pyrolyse

In onderstaande figuur wordt de relatieve bijdrage van de verschillende kostencategorieën aan de totale operationele kosten weergegeven. De berekeningen zijn gebeurd op basis van het gemiddelde over de verschillende vermogens. Net zoals bij gescheiden opwekking van elektriciteit vormen de aanvoerkosten van het korte omloophout de grootste kostencategorie.



Figuur 23: taartdiagram operationele kosten WKK bij pyrolyse

In onderstaande tabel wordt het aandeel van de initiële investeringskost in de totale kosten weergegeven voor de verschillende capaciteiten. Onder de totale kosten verstaan we de totale operationele kosten gedurende 20 jaar en de initiële investeringskost.

Vermogen pyrolyse-installatie (MW _e)	Aandeel initiële investering in totale kosten (%)
5	16,58
10	14,64
20	12,98
30	12,17
40	11,50
50	11,04

Tabel 129: aandeel initiële investering in totale kosten bij WKK pyrolyse

Net zoals bij vergassing stellen we een daling van het aandeel vast naarmate het vermogen van de installatie toeneemt. De reden hiervoor is een groter schaalvoordeel in de initiële investeringskost dan in de operationele kosten, ondanks de meer dan proportionele toename van de kosten voor de verdeling van warmte. De percentages in tabel 129 zijn voor alle capaciteiten kleiner dan de percentages in tabel 120. Dit kunnen we verklaren door het feit dat de initiële investeringskost bij pyrolyse lager is en de totale operationele kosten hoger zijn dan bij vergassing.

8.5 Operationele opbrengsten

De operationele opbrengsten bestaan voor zowel vergassing als pyrolyse uit de opbrengsten uit de verkoop van elektriciteit en warmte. Andere ontvangsten voor de uitbater van de WKK-installatie zijn de ontvangsten uit de verkoop van de groenestroom- en warmtekrachtcertificaten.

8.5.1 Opbrengsten uit verkoop elektriciteit vergassing

Het berekenen van de opbrengsten uit de verkoop van elektriciteit bij vergassing (WKK) gebeurt op dezelfde manier als in paragraaf 7.4.1. De verkoopprijs van de geproduceerde warmte bedraagt opnieuw 0,05 EUR per kilowattuur.

Vermogen vergassings-installatie (MW)	Totale hoeveelheid geproduceerde elektriciteit (kWh)	Totale hoeveelheid afgezette elektriciteit (kWh)	Prijs van 1 kWh elektriciteit (EUR)	Totale opbrengsten uit verkoop van elektriciteit (EUR)
5	35 000 000	32 830 000	0,05	1 641 500
10	70 000 000	65 660 000	0,05	3 283 000
20	140 000 000	131 320 000	0,05	6 566 000
30	210 000 000	196 980 000	0,05	9 849 000
40	280 000 000	262 640 000	0,05	13 132 000
50	350 000 000	328 300 000	0,05	16 415 000

Tabel 130: totale opbrengsten uit verkoop van geproduceerde elektriciteit bij WKK vergassing

8.5.2 Opbrengsten uit verkoop elektriciteit pyrolyse

De opbrengsten uit de verkoop van elektriciteit zijn even groot als in paragraaf 7.4.2. De totale hoeveelheid afgezette elektriciteit en de verkoopprijs van de geproduceerde elektriciteit blijven immers even groot.

Vermogen pyrolyse-installatie (MW_e)	Totale hoeveelheid geproduceerde elektriciteit (kWh)	Totale hoeveelheid afgezette elektriciteit (kWh)	Prijs van 1 kWh elektriciteit (EUR)	Totale opbrengsten uit verkoop elektriciteit (EUR)
5	35 000 000	35 000 000	0,05	1 750 000
10	70 000 000	70 000 000	0,05	3 500 000
20	140 000 000	140 000 000	0,05	7 000 000
30	210 000 000	210 000 000	0,05	10 500 000
40	280 000 000	280 000 000	0,05	14 000 000
50	350 000 000	350 000 000	0,05	17 500 000

Tabel 131: totale opbrengsten uit verkoop van geproduceerde elektriciteit bij WKK pyrolyse

8.5.3 Opbrengsten uit verkoop warmte vergassing

De warmte die door de WKK-installatie wordt geproduceerd kan gebruikt worden door de eigenaar van de installatie of een warmteverbruiker op wiens terrein de WKK-installatie zich bevindt. De opbrengst van de warmte die geproduceerd wordt, wordt in dit geval gelijkgesteld aan de vermeden kost voor de productie van dezelfde hoeveelheid warmte in een ketel. (Cogen Vlaanderen, 2006) Zoals reeds vermeld in paragraaf 8.2 wordt er in deze studie echter van uit gegaan dat alle geproduceerde warmte wordt afgezet. De totale opbrengst uit de verkoop van warmte is gelijk aan het product van het aantal kilowattuur verkochte warmte en de prijs van warmte per kilowattuur. (Cogen Vlaanderen, 2006) Dornburg en Faaij (2001) nemen een prijs aan van 0,013 EUR/ kWh. Knoef en Stassen hebben het over een prijs van 4 EUR/ GJ. Dit komt overeen met 0,0144 EUR/ kWh. De Paepe en Mertens (2007) vermelden een prijs voor warmte van 0,02 EUR/ kWh. Dit is ook de prijs die wordt aangenomen bij de berekening van de totale opbrengsten uit de verkoop van warmte. In onderstaande tabel worden de totale opbrengsten uit de verkoop van warmte bij vergassing berekend.

Vermogen vergassingsinstallatie (MW_e)	Aantal geproduceerde kWh warmte	Aantal afgezette kWh warmte	Totale opbrengsten uit verkoop van warmte (EUR)
5	56 000 000	56 000 000	1 120 000
10	112 000 000	112 000 000	2 240 000
20	224 000 000	224 000 000	4 480 000
30	336 000 000	336 000 000	6 720 000
40	448 000 000	448 000 000	8 960 000
50	560 000 000	560 000 000	11 200 000

Tabel 132: totale opbrengsten uit verkoop van warmte bij WKK vergassing

Een gezin verbruikt gemiddeld 20 000 kWh warmte-energie per jaar. (Junior Chamber International) Een pyrolyse-installatie die 560 000 000 kWh warmte per jaar produceert kan dus 28 000 gezinnen van warmte-energie voorzien. Zoals vermeld is in paragraaf 8.2 wonen er in Vlaanderen gemiddeld 189 gezinnen per km². Bij een vergassingsinstallatie van 50 MW_e kan men dus de gezinnen in een gebied van 148 km² van warmte voorzien.

8.5.4 Opbrengsten uit verkoop warmte pyrolyse

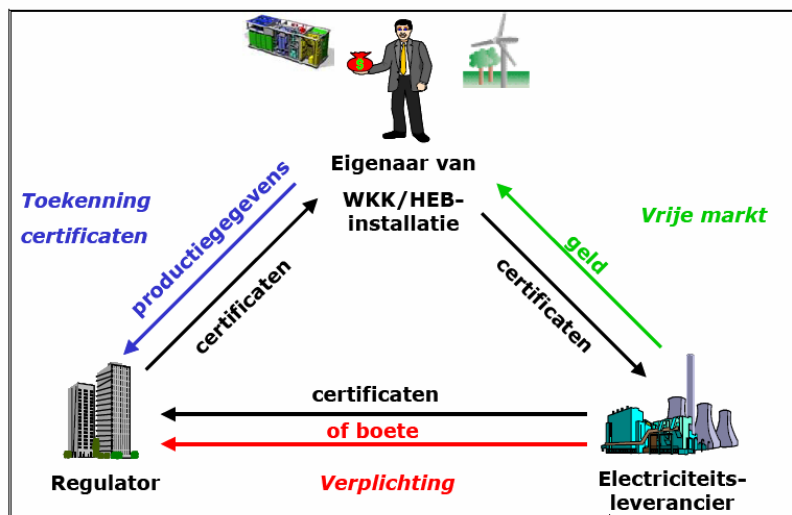
In onderstaande tabel worden de totale opbrengsten uit de verkoop van warmte bij pyrolyse berekend.

Vermogen pyrolyse-installatie (MW_e)	Aantal geproduceerde kWh warmte	Aantal afgezette kWh warmte	Totale opbrengsten uit verkoop van warmte (EUR)
5	49 980 000	49 980 000	999 600
10	100 030 000	100 030 000	2 000 600
20	178 990 000	178 990 000	3 579 800
30	300 020 000	300 020 000	6 000 400
40	399 980 000	399 980 000	7 999 600
50	500 010 000	500 010 000	10 000 200

Tabel 133: totale opbrengsten uit verkoop van warmte bij WKK pyrolyse

8.5.5 Certificatenregeling

De twee certificaten systemen die in Vlaanderen van kracht zijn, zijn de groenestroomcertificaten en de warmtekrachtcertificaten. (Mertens, 2007)



Figuur 24: basisprincipes certificatenstelsysteem

Bron: Cogen Vlaanderen (2006)

Het certificatenstelsysteem werkt als volgt: de eigenaar van de WKK-installatie in Vlaanderen krijgt certificaten van de VREG. Het aantal certificaten dat de eigenaar ontvangt is afhankelijk van de grootte van de productie. Hierna heeft de eigenaar van de WKK-installatie de mogelijkheid om de certificaten tegen de marktprijs te verkopen aan de elektriciteitsleveranciers. Aangezien de certificatenmarkt een vrije markt is, is de eigenaar niet verplicht om zijn certificaten te verkopen aan dezelfde elektriciteitsleverancier aan wie hij elektriciteit koopt of verkoopt. De vraag naar certificaten is verzekerd aangezien de elektriciteitsleveranciers jaarlijks een aantal certificaten moeten kunnen voorleggen aan de VREG. Indien de leverancier niet over voldoende certificaten beschikt, moet hij een administratieve boete betalen van 125 EUR per ontbrekend groenestroomcertificaat en van 45 EUR per ontbrekend warmtekrachtcertificaat. (Cogen Vlaanderen, 2006) Deze boete en de werking van vraag en aanbod op de certificatenmarkt hebben een grote invloed op de prijs die een leverancier wil betalen voor een certificaat op de certificatenmarkt. (VREG, 2008)

8.5.5.1 Groenestroomcertificaten vergassing en pyrolyse

Net zoals in paragraaf 7.4.3 wordt er een gemiddelde prijs van 106,89 EUR per groenestroomcertificaat aangenomen. (VREG, 2008) Aangezien de producent van groene stroom 1 certificaat ontvangt per MWh geproduceerde groene stroom, onafhankelijk van het feit of men deze stroom verkoopt of aanwendt voor eigen gebruik, is het aantal certificaten dat men ontvangt bij vergassing en pyrolyse even groot.

Vermogen installatie (MW_e)	Aantal MWh_e	Aantal certificaten	Opbrengsten uit verkoop groenestroomcertificaten (EUR)
5	35 000	35 000	3 741 150
10	70 000	70 000	7 482 300
20	140 000	140 000	14 964 600
30	210 000	210 000	22 446 900
40	280 000	280 000	29 929 200
50	350 000	350 000	37 411 500

Tabel 134: opbrengsten uit verkoop groenestroomcertificaten

8.5.5.2 Warmtekrachtcertificaten

De toekenning van de warmtekrachtcertificaten gebeurt op basis van de primaire energiebesparing van de WKK ten opzichte van gescheiden productie. Om deze besparing te berekenen worden de rendementen van de zogenaamde "referentie-installaties" van gescheiden productie vastgelegd. Deze rendementen zijn vastgelegd in een uitvoeringsbesluit van de Vlaamse Regering en een beslissing van de VREG. Momenteel is het rendement van de referentieketel voor gescheiden warmteproductie 85% wanneer de warmte wordt geleverd in de vorm van stoom. Bij levering van warmte in de vorm van warm water is dit rendement 90%. (Cogen Vlaanderen, 2006) Het elektrisch rendement van gescheiden opwekking bedraagt 34% voor hout en houtafval. (VREG, 2008) Bij vergassing gebruiken we tijdens onze berekeningen in verband met warmtekrachtcertificaten de rendementen van de omzetting van het korte omloophout in de geproduceerde elektriciteit en warmte. Bij pyrolyse gebruiken we de rendementen van de omzetting van pyrolyse-olie naar elektriciteit en warmte. Het thermisch referentierendement van pyrolyse-olie is 81%. Het elektrische referentierendement van pyrolyse-olie is 44%. (Vlaamse Codex, 2009) Om het aantal warmtekrachtcertificaten,

dat de eigenaar van de WKK-installatie ontvangt, te berekenen vertrekt men vanuit de berekening van de primaire energiebesparing. De primaire energiebesparing voor een bepaalde maand wordt als volgt berekend:

$$PEB = E \left(\frac{1}{\eta_e} + \frac{\alpha_q}{\alpha_e * \eta_q} - \frac{1}{\alpha_e} \right) \quad (35)$$

met:

- PEB: primaire energiebesparing
- E: het binnen de beschouwde periode geleverde elektrisch vermogen door de WKK-installatie (MWh_e)
- α_q : het thermisch rendement van de warmtekrachtinstallatie
- η_q : het thermisch rendement van de referentieketel
- α_e : het elektrisch rendement van de warmtekrachtinstallatie
- η_e : het elektrisch rendement van de referentiecentrale

Om recht te hebben op warmtekrachtcertificaten dient de WKK-installatie te voldoen aan een aantal voorwaarden. Ten eerste dient de warmtekrachtkoppelinginstallatie kwalitatief te zijn. (Cogen Vlaanderen, 2006) Een WKK-installatie is kwalitatief wanneer deze gemiddeld over de laatste 12 maanden een primaire energiebesparing van minimaal 10% realiseert ten opzichte van de referentie-installaties voor gescheiden opwekking. Dit geeft volgende formule:

$$1 - \frac{1}{\frac{\alpha_Q}{\eta_Q} + \frac{\alpha_E}{\eta_E}} \geq 10\% \quad (36)$$

(Dexters, 2007)

Een tweede voorwaarde waaraan men moet voldoen om warmtekrachtcertificaten te verkrijgen is dat de installatie gelegen moet zijn in het Vlaamse Gewest. Bovendien moet de installatie in dienst genomen zijn of ingrijpend gewijzigd zijn na 1 januari 2002. (Cogen Vlaanderen, 2006)

Een andere beperking is dat het aantal te verkrijgen warmtekrachtcertificaten vermindert naarmate de levensduur van de installatie toeneemt. Tijdens de eerste 48 maanden dat de WKK-installatie operationeel is ontvangt men nog alle certificaten. Vanaf maand 49

ontvangt men echter nog slechts een fractie X van de certificaten. De berekening van X gebeurt als volgt:

$$X = \frac{RPE - 0,2 * (T - 48)}{RPE} \quad (37)$$

met:

- T: de tijd in maanden sinds de indienstname van de installatie
- RPE: de relatieve primaire energiebesparing

Aangezien X wordt bepaald door de RPE zal een installatie die relatief veel brandstof bespaart langer kunnen genieten van de certificatensteun. (Mertens, 2007)

Voor de vergassingsinstallatie met een elektrisch rendement van 25% en een thermisch rendement van 40% berekenen we de relatieve energiebesparing als volgt:

$$RPE = 1 - \frac{1}{(0,40/0,85) + (0,25/0,34)} = 0,1707 = 17,07\% \quad (38)$$

Voor de dieselmotor met een elektrisch rendement van 35% en een thermisch rendement van 50% geeft dit:

$$RPE = 1 - \frac{1}{(0,50/0,81) + (0,35/0,44)} = 0,2922 = 29,22\% \quad (39)$$

Aangezien voor beide installaties de relatieve energiebesparing groter is dan 10% wordt er aan de eerste voorwaarde voldaan. We kunnen dus spreken van kwalitatieve WKK-installaties.

8.5.5.2.1 Warmtekrachtcertificaten vergassing

In onderstaande tabel worden het aantal certificaten dat men ontvangt op jaarbasis berekend.

Vermogen vergassingsinstallatie (MW _e)	Elektriciteitsoutput op jaarbasis (MWh _e)	PEB op jaarbasis (MWh _e)	Aantal certificaten op jaarbasis voor jaar 1-4
5	35 000	28 824	28 824
10	70 000	57 648	57 648
20	140 000	115 296	115 296
30	210 000	172 944	172 944
40	280 000	230 580	230 580
50	350 000	288 240	288 240

Tabel 135: aantal warmtekrachtcertificaten voor jaar 1-4 bij WKK vergassing

In tabel 136 worden de opbrengsten uit de verkoop van de warmtekrachtcertificaten berekend. De verkoopprijs die wordt gehanteerd is 41,45 EUR/ kWh. Dit is de gemiddelde verkoopprijs van oktober 2008. (VREG, 2008) Uit de tabel wordt duidelijk dat het aantal te verkrijgen warmtekrachtcertificaten en dus ook de opbrengsten uit de verkoop van de certificaten verminderen naarmate de levensduur van de installatie toeneemt. Bij deze installatie kan men slechts 11 jaar genieten van deze certificatensteun.

Jaar	5 MW _e	10 MW _e	20 MW _e	30 MW _e	40 MW _e	50 MW _e
1	1 194 755	2 389 510	4 779 019	7 168 529	9 557 541	11 947 548
2	1 194 755	2 389 510	4 779 019	7 168 529	9 557 541	11 947 548
3	1 194 755	2 389 510	4 779 019	7 168 529	9 557 541	11 947 548
4	1 194 755	2 389 510	4 779 019	7 168 529	9 557 541	11 947 548
5	1 103 814	2 207 668	4 415 337	6 623 005	8 830 218	11 038 342
6	935 858	1 871 716	3 743 391	5 612 952	7 486 409	9 358 498
7	767 861	1 535 723	3 071 486	4 607 209	6 142 641	7 678 695
8	599 906	1 199 770	2 399 541	3 599 311	4 798 832	5 998 851
9	432 033	864 067	1 728 092	2 592 159	3 456 018	4 320 251
10	264 037	528 073	1 056 146	1 584 260	2 112 209	2 640 406
11	96 040	192 121	384 242	576 362	768 442	960 562
12	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0

Tabel 136: opbrengsten uit verkoop warmtekrachtcertificaten bij WKK vergassing

8.5.5.2.2 Warmtekrachtcertificaten pyrolyse

In onderstaande tabel worden het aantal certificaten dat men ontvangt op jaarbasis berekend.

Vermogen pyrolyse-installatie (MW _e)	Elektriciteitsoutput op jaarbasis (MWh _e)	PEB op jaarbasis (MWh _e)	Aantal certificaten op jaarbasis voor jaar 1-4
5	35 000	41 274	41 274
10	70 000	82 548	82 548
20	140 000	165 095	165 095
30	210 000	247 643	247 643
40	280 000	330 191	330 191
50	350 000	412 738	412 738

Tabel 137: aantal warmtekrachtcertificaten voor jaar 1-4 bij WKK pyrolyse

In tabel 138 worden de opbrengsten uit de verkoop van de warmtekrachtcertificaten berekend op basis van een verkoopprijs van 41,45 EUR/ kWh. Bij deze installatie kan men 16 jaar genieten van de certificatensteun.

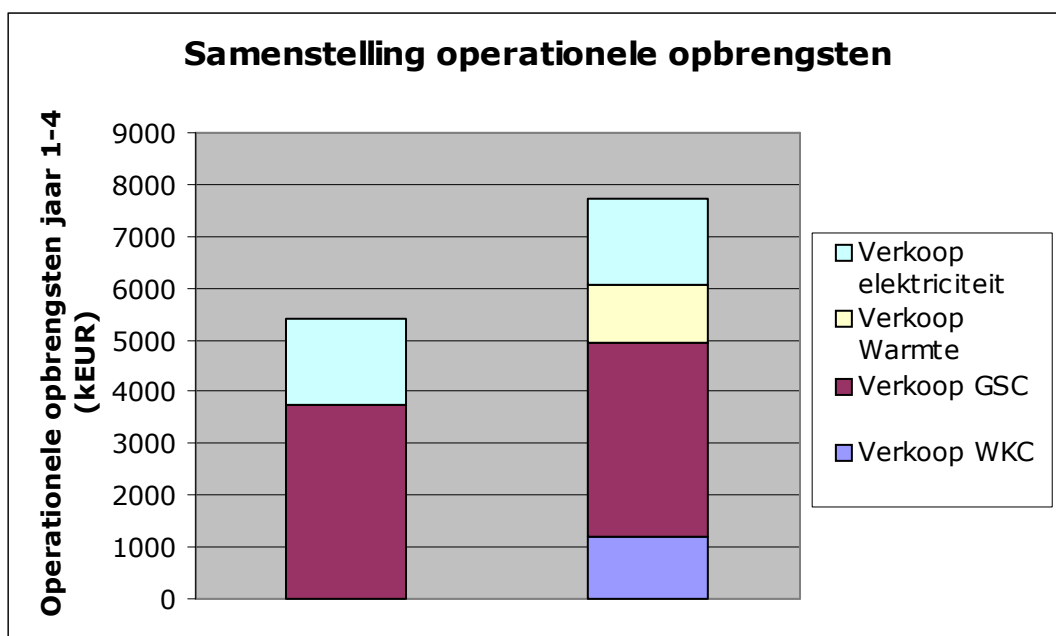
Jaar	5 MW _e	10 MW _e	20 MW _e	30 MW _e	40 MW _e	50 MW _e
1	1 710 801	3 421 602	6 843 204	10 264 806	13 686 409	17 108 011
2	1 710 801	3 421 602	6 843 204	10 264 806	13 686 409	17 108 011
3	1 710 801	3 421 602	6 843 204	10 264 806	13 686 409	17 108 011
4	1 710 801	3 421 602	6 843 204	10 264 806	13 686 409	17 108 011
5	1 634 676	3 269 351	6 538 703	9 808 054	13 077 405	16 346 757
6	1 494 136	2 988 273	5 976 546	8 964 819	11 953 091	14 941 364
7	1 353 597	2 707 194	5 414 389	8 121 583	10 828 778	13 535 972
8	1 213 058	2 426 116	4 852 232	7 278 348	9 704 464	12 130 580
9	1 072 519	2 145 038	4 290 075	6 435 113	8 580 150	10 725 188
10	931 980	1 863 959	3 727 918	5 591 877	7 455 836	9 319 795
11	791 440	1 582 881	3 165 761	4 748 642	6 331 522	7 914 403
12	650 901	1 301 802	2 603 604	3 905 406	5 207 209	6 509 011
13	510 362	1 020 724	2 041 447	3 062 171	4 082 895	5 103 618
14	369 823	739 645	1 479 290	2 218 936	2 958 581	3 698 226
15	229 283	458 567	917 134	1 375 700	1 834 267	2 292 834
16	88 744	177 488	354 977	532 465	709 953	887 442
17	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0

Tabel 138: opbrengsten uit verkoop warmtekrachtcertificaten bij WKK pyrolyse

8.5.5.3 Combinatie certificaten

Beide WKK-installaties komen in aanmerking voor zowel groenestroomcertificaten als warmtekrachtcertificaten aangezien ze allebei een hernieuwbare energiebron als brandstof gebruiken. Men moet echter in het achterhoofd houden dat men om warmtekrachtcertificaten te bekomen moet voldoen aan de eis van 10% relatieve energiebesparing. Zoals eerder vermeld voldoen beide installaties aan deze eis. (Mertens, 2007)

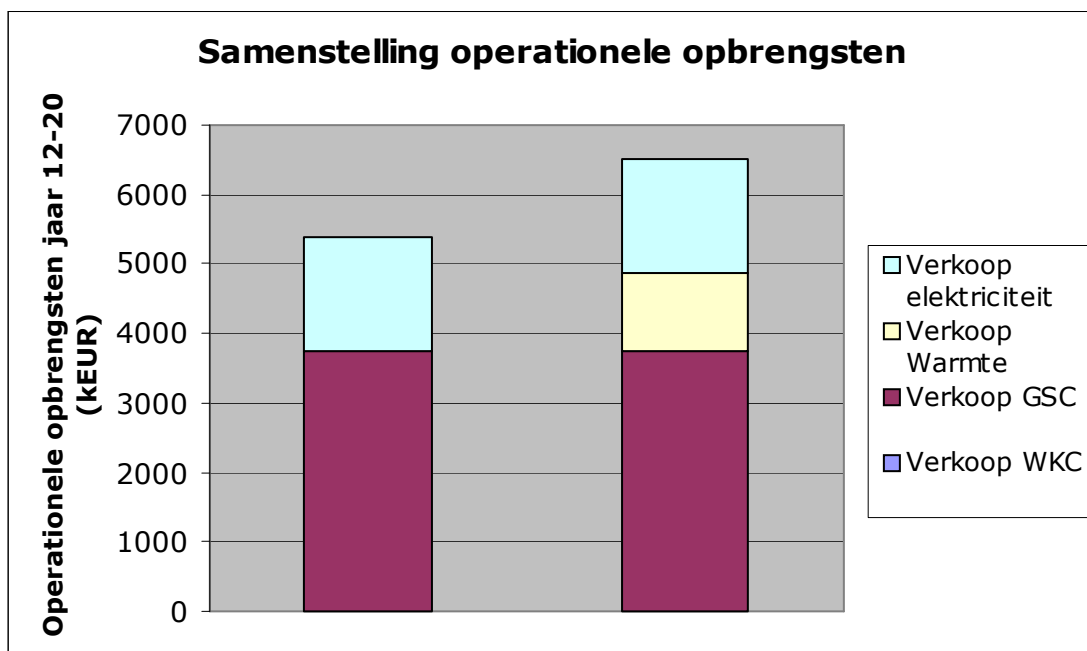
8.5.5.4 Samenstelling operationele opbrengsten vergassing



Figuur 25: samenstelling operationele opbrengsten vergassing bij een capaciteit van 5 MW_e voor jaren 1 - 4

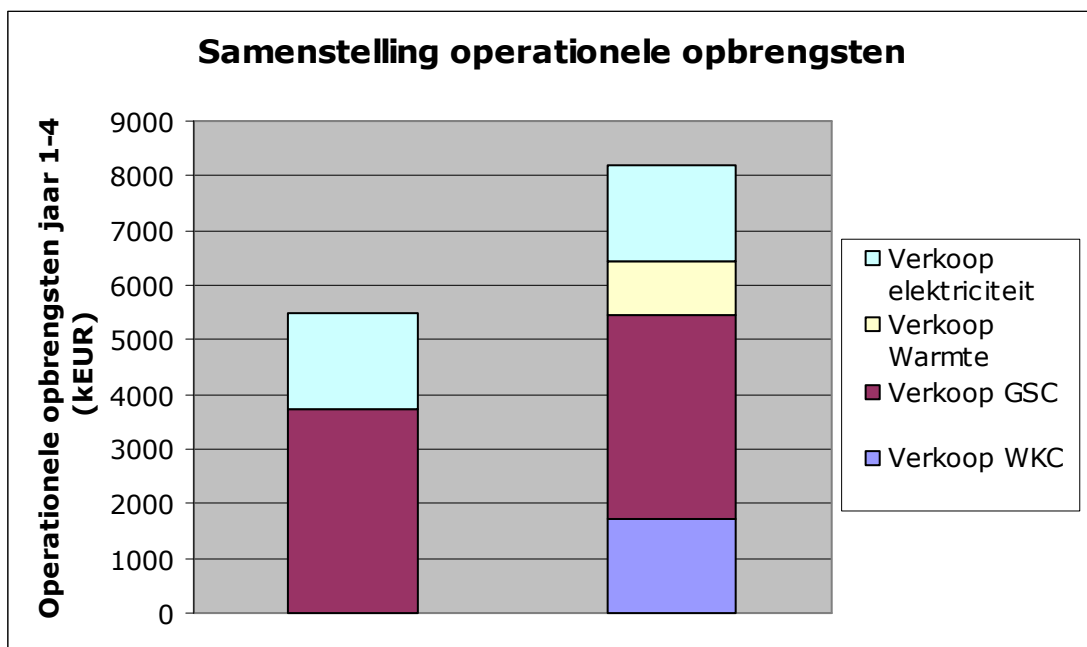
In deze figuur wordt een vergelijking gemaakt tussen de operationele opbrengsten van een vergassingsinstallatie van 5 MW_e (links) waarin er enkel elektriciteit wordt opgewekt en een WKK-installatie van 5 MW_e (rechts) waarin er naast elektriciteit ook warmte wordt geproduceerd. Deze gegevens zijn enkel van toepassing voor jaar één tot en met jaar vier. Immers, vanaf jaar vijf worden de ontvangsten uit de verkoop van warmtekrachtcertificaten steeds kleiner. Uit de figuur wordt de positieve invloed van de verkoop van warmte en de verkoop van de ontvangen warmtekrachtcertificaten op de operationele opbrengsten duidelijk. Figuur 26 geeft de samenstelling van de operationele opbrengsten weer bij een capaciteit van 5MW_e voor de jaren 12 tot 20. Vanaf jaar 12

ontvangt men geen warmtekrachtcertificaten meer. Hierdoor wordt het verschil in operationele opbrengsten tussen beide alternatieven een stuk kleiner. Het verschil bestaat enkel nog uit de verkoopopbrengsten van warmte.



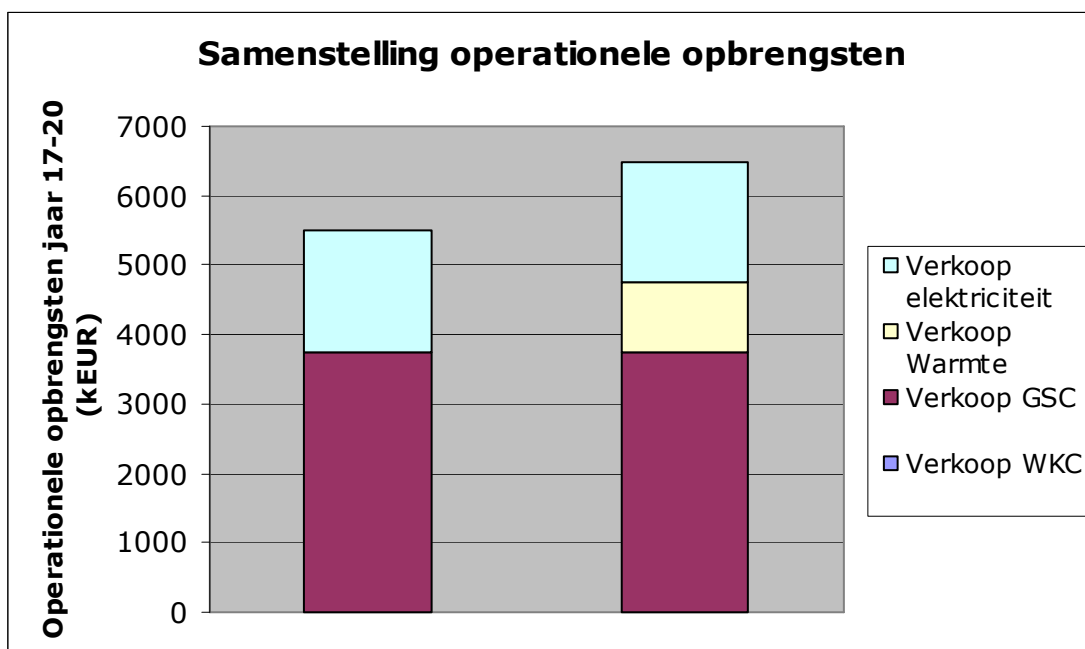
Figuur 26: samenstelling operationele opbrengsten vergassing bij een capaciteit van 5 MW_e voor jaren 12 – 20

8.5.5.5 Samenstelling operationele opbrengsten pyrolyse



Figuur 27: samenstelling operationele opbrengsten pyrolyse bij een capaciteit van 5 MW_e voor jaren 1 – 4

In bovenstaande figuur wordt een vergelijking gemaakt tussen de operationele opbrengsten van een pyrolyse-installatie van 5 MW_e (links) waarin er enkel elektriciteit wordt opgewekt en een WKK-installatie van 5 MW_e (rechts). Deze gegevens zijn enkel van toepassing voor jaar één tot en met jaar vier. Immers, vanaf jaar vijf worden de ontvangsten uit de verkoop van warmtekrachtcertificaten steeds kleiner. Uit de figuur wordt de positieve invloed van de verkoop van warmte en de verkoop van de ontvangen warmtekrachtcertificaten op de operationele opbrengsten duidelijk. Figuur 28 geeft de samenstelling van de operationele opbrengsten weer bij een capaciteit van 5MW_e voor de jaren 17 tot 20. Vanaf jaar 17 ontvangt men geen warmtekrachtcertificaten meer. Hierdoor wordt het verschil in operationele opbrengsten tussen beide alternatieven een stuk kleiner.



Figuur 28: samenstelling operationele opbrengsten pyrolyse bij een capaciteit van 5 MW_e voor jaren 17 – 20

8.6 NCW WKK vergassing en pyrolyse

In tegenstelling tot in hoofdstuk 7 zijn de netto kasstromen niet elk jaar even groot. De reden hiervoor is dat de ontvangsten uit de verkoop van de warmtekrachtcertificaten dalen in de tijd. Enkel tijdens de eerste vier jaren zijn de ontvangsten aan elkaar gelijk. Daarna worden ze elk jaar kleiner.

Vermogen (MW _e)	NCW vergassing (EUR)	NCW pyrolyse (EUR)
5	989 724	7 607 044
10	14 804 738	21 743 803
20	43 431 672	48 347 783
30	75 358 854	79 691 161
40	108 807 435	106 353 617
50	140 631 537	133 358 305

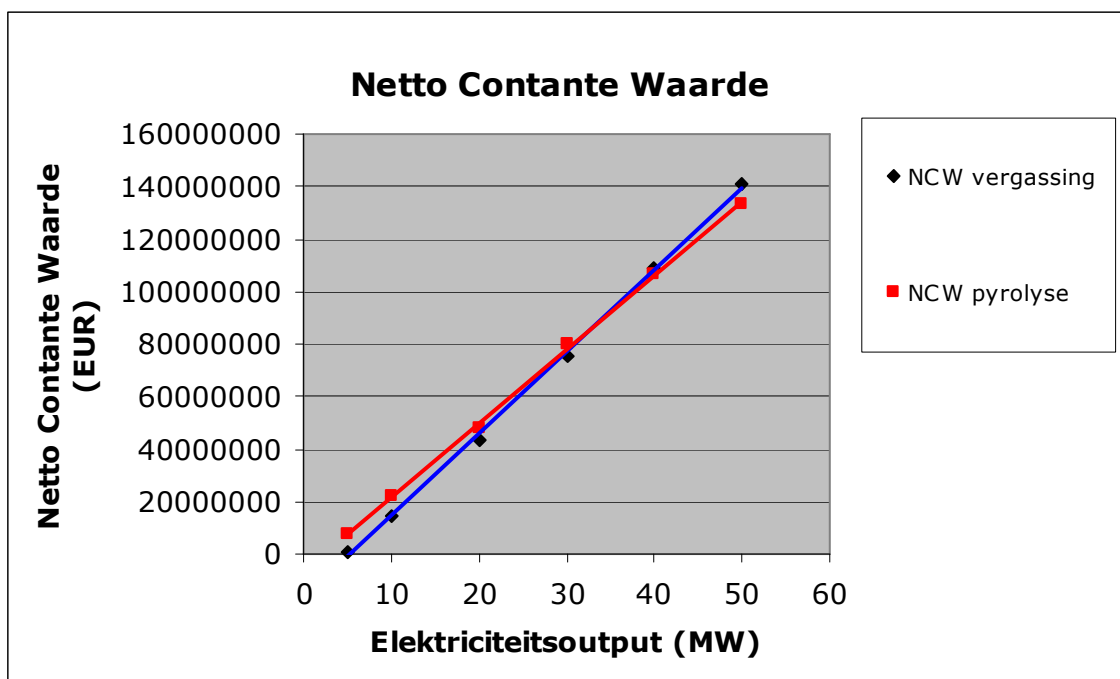
Tabel 139: netto contante waarde vergassing en pyrolyse bij WKK

Vergelijking van tabel 139 met tabel 84 leert ons dat bij vergassing de investering in een WKK-installatie voor de vermogens 5, 10, 20, 30 en 40 MW_e tot een hogere NCW leidt dan een investering in een installatie waarin er enkel elektriciteit wordt opgewekt. Voor een vermogen van 50 MW_e ligt de NCW echter lager dan in tabel 84. Ten opzichte van het alternatief waarin er enkel elektriciteit wordt geproduceerd wordt de investeringskost bij vergassing verhoogd door een lagere elektrische efficiëntie en door de extra kosten voor de verdeling van de warmte. Verder nemen de jaarlijkse operationele kosten in tabel 119 toe ten opzichte van de jaarlijkse operationele kosten in tabel 61. Aangezien de investeringskost toeneemt nemen immers ook de operationele kosten die variëren met deze investeringskost toe. Ook de aanvoerkosten van het korte omloophout lopen hoog op omwille van de lagere elektrische efficiëntie. Verder stellen we ook een stijging van de personeelskosten vast omwille van de lagere elektrische efficiëntie.

Hiertegenover staan dan weer de extra kasopbrengsten uit de verkoop van warmte en de warmtekrachtcertificaten. Bij de vermogens tussen 5 en 40 MW_e worden de extra kosten van de investering en de hogere jaarlijkse operationele kosten ruimschoots gecompenseerd door de extra ontvangsten. Bij een vermogen van 50 MW_e wegen de hogere ontvangsten echter niet op tegen de hogere investeringskost en de hogere operationele kosten. Van grote invloed hierbij is de extra investeringskost voor de verdeling van warmte. Uit figuur 18 blijkt immers dat deze zeer sterk toeneemt naarmate er meer warmte wordt afgezet.

Bij pyrolyse zorgen de lagere elektrische efficiëntie en de extra kosten voor de verdeling van warmte voor een hogere investeringskost dan in het alternatief waarin er enkel elektriciteit wordt opgewekt. Ook de jaarlijkse operationele kosten nemen toe. De onderhoudskosten, de verzekeringskosten en de algemene overheadkosten nemen toe aangezien zij variëren met de totale investeringskosten. De personeelskosten, de aanvoerkosten en de energiekosten van het korte omloophout zijn groter dan bij gescheiden productie van elektriciteit omwille van de verlaagde elektrische efficiëntie.

Tegenover deze extra investeringskost en de hogere jaarlijkse operationele kosten staan de kasopbrengsten uit de verkoop van warmte en de warmtekrachtcertificaten. Deze compenseren voor alle capaciteiten ruimschoots de extra investeringskost en de extra operationele kosten. Dit verklaart waarom de NCW in tabel 139 voor alle capaciteiten groter is dan in tabel 84.



Figuur 29: netto contante waarde in functie van elektriciteitsoutput (vergassing en pyrolyse WKK)

Bij gescheiden productie van elektriciteit was de NCW van pyrolyse groter dan die van vergassing bij een capaciteit van 5 MW_e. Voor een hogere capaciteit was de NCW het hoogst voor de vergassingsinstallatie. Uit figuur 29 blijkt dat wanneer er naast elektriciteit ook warmte wordt afgezet, de NCW van pyrolyse het hoogst is bij een capaciteit van 5 tot 30 MW_e. Bij een capaciteit van 40 en 50 MW_e is de NCW van vergassing hoogst.

Net zoals in hoofdstuk 7 ligt de investeringskost van de vergassingsinstallatie hoger dan die van de pyrolyse-installatie. De jaarlijkse operationele kosten zijn opnieuw het hoogst bij pyrolyse. Het verschil is echter kleiner dan bij gescheiden productie van elektriciteit. Omwille van de sterkere toename van de totale investeringskosten bij vergassing zijn ook de operationele kosten die variëren met deze totale investeringskosten meer toegenomen dan bij pyrolyse. Verder is de daling van elektrische efficiëntie bij vergassing

groter dan bij pyrolyse, waardoor de toename van de aangevoerde hoeveelheid korte omloophout het grootst is bij vergassing. Hierdoor nemen de kosten die afhankelijk zijn van de aangevoerde hoeveelheid korte omloophout het meest toe bij vergassing.

De operationele opbrengsten zijn het hoogst bij pyrolyse omwille van de hogere opbrengsten uit de verkoop van warmtekrachtcertificaten.

Tabel 140 geeft weer welk van beide technieken de voorkeur verdient bij een bepaald vermogen op basis van de NCW bij zowel gescheiden productie van elektriciteit als bij WKK.

Vermogen (MW _e)	Keuze bij gescheiden productie elektriciteit	Keuze bij WKK
5	Pyrolyse	Pyrolyse
10	Pyrolyse	Pyrolyse
20	Vergassing	Pyrolyse
30	Vergassing	Pyrolyse
40	Vergassing	Vergassing
50	Vergassing	Vergassing

Tabel 140 : keuze tussen vergassing en pyrolyse bij gescheiden productie elektriciteit en WKK

8.7 Vergelijking met de werkelijkheid

De berekening van de NCW in hoofdstuk 7 en de voorgaande paragrafen van hoofdstuk 8 zijn gebaseerd op theoretische modellen en formules. In deze paragraaf wordt onderzocht in welke mate deze theoretische cijfers overeenstemmen met de werkelijkheid. Dit gebeurt zowel voor vergassing als pyrolyse.

In 1991 werd in het Zweedse Värnamo de bouw gestart van een wervelbedvergasser gevolgd door een STEG-centrale met een capaciteit van 6 MW_e. 4,2 MW_e werd opgewekt in de gasturbine, de overige 1,8 MW_e in de stoomturbine. Het ging hier om een WKK-installatie waardoor niet enkel elektriciteit, maar ook warmte geproduceerd werd. Het thermisch vermogen van de installatie bedroeg 6 MW_{th}. De installatie had een elektrische efficiëntie van 32%, een thermische efficiëntie van 50% en was 8 500 uren/ jaar operationeel tussen 1991 en 1999. (Stahl *et al.*, 2007) De totale investeringskost werd

geraamd op 35 000 000 EUR (International Sugarcane Biomass Utilization Consortium, 2007)

Onder deze omstandigheden wordt er op basis van de indeling van Caputo *et al.* (2005) een totale investeringskost van 28 225 427 EUR gevonden. De investeringskost die wordt berekend met behulp van formules (13) en (14) van Bridgwater *et al.* (2002) bedraagt 24 251 746 EUR. In beide berekeningen zitten de kosten voor de verdeling van warmte inbegrepen. De raming van 35 000 000 EUR wordt het dichtst benaderd met de berekeningen die gebaseerd zijn op Caputo *et al.* (2005).

In 2000 werden de activiteiten in deze installatie stilgelegd aangezien het testprogramma vervolledigd was en de opbrengsten van de verkoop van warmte en elektriciteit de operationele kosten niet volledig konden compenseren. (Växjö Värnamo Biomass Gasification Centre) Intussen is men echter begonnen met verbouwingwerken van de installatie. Er wordt verwacht dat de vergasser opnieuw operationeel is in mei 2009. (Sweco, 2007)

In het Oostenrijkse Güssing bevindt zich een wervelbedvergasser met een capaciteit van 2 MW_e. Het gaat hier weer om een WKK-installatie, maar deze keer met een thermische capaciteit van 4,5 MW_{th}. De thermische efficiëntie van de installatie is 56,3% en elektrische efficiëntie is 25%. (Simader, 2004)

De grondstoffen van het vergassingsproces zijn houtchips en reststoffen uit de industrie. De geproduceerde warmte wordt aangewend om huizen in een straal van 30 kilometer rondom te installatie te voorzien van warmte. De installatie draait gedurende 7 500 uren per jaar en de totale investeringskosten worden geraamd op ongeveer 10 000 000 EUR. (Hofbauer)

Op basis van de indeling van Caputo *et al.* (2005) vinden we voor de omstandigheden die in de installatie van Güssing gelden een totale investeringskost van 14 997 058 EUR. De investeringskost die wordt berekend met behulp van formules (13) en (14) van Bridgwater *et al.* (2002) bedraagt 11 405 419 EUR. De geraamde waarde van 10 000 000 EUR wordt in dit geval het best benaderd met de berekeningen die gebaseerd zijn op Bridgwater *et al.* (2002). In beide berekeningen zitten de kosten voor de verdeling van warmte inbegrepen. Verder vermeldt Hofbauer dat de jaarlijkse operationele kosten 10 tot 15 % van de totale investeringskost bedragen. Dit zou dus betekenen dat de jaarlijkse operationele kosten tussen 1 000 000 EUR en 1 500 000 EUR per jaar liggen. Eigen berekeningen op basis van Caputo *et al.* (2005) leveren voor de gegevens een

jaarlijkse operationele kost op van 2 171 773 EUR. Op basis van Bridgwater *et al.* (2002) wordt een jaarlijkse operationele kost van 2 028 107 EUR gevonden.

Op 4 december 2008 brachten we een bezoek aan de Bio Oil Exploitation van Marinus van Stijn in Tessenderlo. In deze installatie wordt er biomassa, die wordt aangevoerd tegen een flow ratio van 5 ton per uur, in pyrolyse-olie omgezet. Er wordt geen elektriciteit of warmte opgewekt. De totale investeringskost van deze installatie is ongeveer 8 700 000 EUR. Onder dezelfde omstandigheden die in de installatie in Tessenderlo gelden komt men met behulp van formules (15) en (16) tot een investeringskost van 7 976 313 EUR. Het gaat hier enkel om de investeringskost in de pyrolyse-reactor voor de omzetting van de biomassa naar de pyrolyse-olie. De investeringskost in de dieselmotor wordt hier immers niet meegerekend aangezien er geen omzetting van de pyrolyse-olie in elektriciteit en warmte gebeurt.

Dynamotive ontwikkelde een pyrolyse-installatie in Guelph in Canada die 200 ton biomassa per dag kan verwerken. De biomassa bestaat uit afval en hout. Er wordt enkel pyrolyse-olie geproduceerd, er gebeurt dus geen omzetting in elektriciteit en warmte. (Dynamotive, 2008) De bouw van deze installatie is nog niet afgerond, maar de investeringskost wordt geraamd op 14 430 000 EUR. (Ontario, 2008)

Deze investeringskost kan benaderd worden door gebruik te maken van formules (15) en (16). Deze formules leveren een investeringskost van 10 942 519 EUR op.

Uit het voorgaande blijkt dat het moeilijk is om de praktijkvoorbeelden nauwkeurig te benaderen met behulp van de theoretische modellen en formules. De investeringskost van elke installatie hangt immers af van specifieke omstandigheden die men moeilijk in deze modellen en formules kan opnemen. De investeringskosten die in hoofdstuk 7 en de voorgaande paragrafen van hoofdstuk 8 berekend worden dienen dus met de nodige voorzichtigheid geïnterpreteerd te worden. Het dient echter ook vermeld te worden dat de investeringskosten waarmee de theoretische cijfers vergeleken worden meestal ruwe schattingen zijn.

In tabel 141 wordt de procentuele afwijking van de totale investeringskosten ten opzichte van de werkelijkheid voor de besproken praktijkvoorbeelden weergegeven.

Praktijkvoorbeeld	Afwijking in totale investeringskosten berekeningen Caputo <i>et al.</i> (2005) met praktijkvoorbeeld	Afwijking in totale investeringskosten berekeningen Bridgwater <i>et al.</i> (2002) met praktijkvoorbeeld
WKK-vergassingsinstallatie Värnamo	19,36% (onderschatting)	30,71% (onderschatting)
WKK-vergassingsinstallatie Güssing	49,97% (overschatting)	14,05% (overschatting)
Pyrolyse-installatie Tessengerlo	/	8,32% (onderschatting)
Pyrolyse-installatie Guelph	/	24,2% (onderschatting)

Tabel 141: procentuele afwijking in totale investeringskosten

Hoofdstuk 9: Pyrolyse voor verkoop van pyrolyse-olie

In dit hoofdstuk wordt nagegaan of het rendabel is voor de eigenaar van een pyrolyse-installatie om enkel de geproduceerde pyrolyse-olie te verkopen. Dit is ook het opzet van de Bio Oil Exploitation NV van Marinus van Stijn. Aangezien er in deze situatie geen elektriciteit wordt opgewekt wordt er in deze analyse niet vertrokken vanuit het elektrisch vermogen van de installatie, maar wel vanuit de hoeveelheid korte omloophout die in de installatie wordt aangevoerd.

9.1 De initiële investering

9.1.1 Totale investeringskosten

De totale investering van de installatie bestaat uit een investering in het eigenlijke pyrolyseproces en in de opslag van de geproduceerde pyrolyse-olie. Aangezien er geen elektriciteit en warmte worden geproduceerd omvat de totale investering dus niet de investering in de dieselmotor. We veronderstellen dat de totale investeringskosten van het eigenlijke pyrolyseproces en de totale opslagkosten van de pyrolyse-olie even groot zijn als in paragraaf 7.1.2. De waarden uit de eerste kolom van tabel 142 zijn afkomstig van tabel 11. Het gaat hier om het aantal ton droge stof biomassa die men dient aan te voeren bij een totale elektrische efficiëntie van 26,25%. In dit hoofdstuk kan men echter niet spreken van een elektrische efficiëntie omdat er geen elektriciteit wordt geproduceerd. Om de vergelijkbaarheid met hoofdstuk 6 en hoofdstuk 7 te garanderen wordt er echter gekozen om met dezelfde hoeveelheid aangevoerde biomassa te werken.

Aantal ton droge stof biomassa M (tds/jaar)	Totale investeringskosten eigenlijke pyrolyseproces (EUR)	Totale opslagkosten pyrolyse-olie (EUR)	Totale investeringskosten (EUR)
26 667	6 740 391	177 040	6 917 431
53 333	10 354 832	234 158	10 588 990
106 667	15 907 468	310 056	16 217 524
160 000	20 448 995	365 270	20 814 265
213 333	24 437 627	410 399	24 848 026
266 667	28 059 834	449 131	28 508 965

Tabel 142: totale investeringskosten pyrolyse-installatie bij enkel verkoop pyrolyse-olie

9.1.2 Ecologiepremie

Uit het gesprek met Marinus van Stijn bleek dat de productie van pyrolyse-olie uit biomassa in aanmerking komt voor de ecologiepremie. De geproduceerde pyrolyse-olie kan immers later nog worden aangewend om elektriciteit en warmte op te wekken.

Het aandeel van de totale investering dat in aanmerking komt voor de premie is terug te vinden in tabel 39. De ecologiepremie wordt in onderstaande tabel berekend.

Aantal ton droge stof biomassa M (tds/ jaar)	Totale kostprijs essentiële investeringscomponenten (EUR)	Ecologiepremie (EUR)
26 667	3 460 099	692 020
53 333	5 416 268	1 083 254
106 667	8 460 682	1 692 136
160 000	10 937 896	1 750 000
213 333	13 154 545	1 750 000
266 667	15 200 980	1 750 000

Tabel 143: ecologiepremie pyrolyse bij enkel verkoop pyrolyse-olie

9.1.3 Investeringsaftrek

Om dezelfde reden als bij de ecologiepremie komt het project ook in aanmerking voor de verhoogde investeringsaftrek. De in aanmerking komende investeringscomponenten worden berekend op basis van tabel 43. De belastingsvoet bedraagt 33% en het investeringsaftrekpercentage is 15,5%.

Aantal ton droge stof biomassa M (tds/ jaar)	In aanmerking komende investeringscomponenten (EUR)	Verhoogde investeringsaftrek (EUR)
26 667	3 884 829	198 709
53 333	6 070 668	310 515
106 667	9 469 412	484 360
160 000	12 236 706	625 908
213 333	14 710 031	752 418
266 667	16 991 343	869 107

Tabel 144: verhoogde investeringsaftrek pyrolyse bij enkel verkoop pyrolyse-olie

9.1.4 De initiële investering van pyrolyse

De initiële investering in de pyrolyse-installatie wordt berekend door de ecologiepremie en de verhoogde investeringaftrek van de totale investeringskosten af te trekken.

	5 MW _e	10 MW _e	20 MW _e	30 MW _e	40 MW _e	50 MW _e
Totale investeringskosten (EUR)	6 917 431	10 588 990	16 217 524	20 814 265	24 848 026	28 508 965
Ecologiepremie (EUR)	692 020	1 083 254	1 692 136	1 750 000	1 750 000	1 750 000
Investeringsaftrek (EUR)	198 709	310 515	484 360	625 908	752 418	869 107
Initiële investering (EUR)	6 026 702	9 195 221	14 041 028	18 438 357	22 345 608	25 889 858

Tabel 145: initiële investering pyrolyse bij enkel verkoop pyrolyse-olie

9.2 Operationele kosten pyrolyse

9.2.1 Onderhoudskosten

Van Stijn (2008) hanteert voor de onderhoudskosten een percentage van 5% van de totale investeringskosten.

Aantal ton droge stof biomassa M (tds/ jaar)	Totale investeringskosten (EUR)	Onderhoudskosten (EUR)
26 667	6 917 431	345 872
53 333	10 588 990	529 450
106 667	16 217 524	810 876
160 000	20 814 265	1 040 713
213 333	24 848 026	1 242 401
266 667	28 508 965	1 425 448

Tabel 146: onderhoudskosten pyrolyse bij enkel verkoop pyrolyse-olie

9.2.2 Personeelskosten

Om de personeelskosten te berekenen wordt er gebruik gemaakt van de formules (27) en (28) die werden gehanteerd in paragraaf 7.3.2. Er wordt opnieuw uit gegaan van een

gemiddeld jaarloon per werknemer van 52 000 EUR en ook nu werkt men in drie shiften. In de Bio Oil Exploitation NV in Tessenderlo wordt er 5 ton droge stof per uur aangevoerd en werken er 11 werknemers.

Aantal ton droge stof biomassa M (tds/jaar)	Q_{dry} (tds/ uur)	Aantal werknemers bij 3 shiften (met afronding)	Totale personeelskosten (EUR)
26 667	3,81	6	312 000
53 333	7,62	9	468 000
106 667	15,24	12	624 000
160 000	22,86	14	728 000
213 333	30,48	16	832 000
266 667	38,10	18	936 000

Tabel 147: totale personeelskosten pyrolyse bij enkel verkoop pyrolyse-olie

9.2.3 Aanvoerkosten korte omloophout

De aanvoerkosten van het korte omloophout zijn even groot als in tabel 70.

Aantal ton droge stof biomassa M (tds/jaar)	Totale Aanvoerkosten (EUR)
26 667	2 213 361
53 333	4 533 305
106 667	9 493 363
160 000	14 560 000
213 333	20 053 302
266 667	25 600 032

Tabel 148: totale aanvoerkosten korte omloophout bij enkel verkoop pyrolyse-olie

9.2.4 Verzekeringskosten

De verzekeringskosten maken 2% uit van de totale investeringskosten. (Islam en Ani, 2000)

Aantal ton droge stof biomassa M (tds/ jaar)	Totale investeringskosten (EUR)	Verzekeringskosten (EUR)
26 667	6 917 431	138 349
53 333	10 588 990	211 780

106 667	16 217 524	324 350
160 000	20 814 265	416 285
213 333	24 848 026	496 961
266 667	28 508 965	570 179

Tabel 149: verzekeringskosten pyrolyse bij enkel verkoop pyrolyse-olie

9.2.5 Algemene overheadkosten

De algemene overheadkosten hebben een aandeel van 2,5% in de totale investeringskosten. Dit is hetzelfde percentage als in paragraaf 7.3.5.

Aantal ton droge stof biomassa M (tds/ jaar)	Totale investeringskosten (EUR)	Algemene overheadkosten (EUR)
26 667	6 917 431	172 936
53 333	10 588 990	264 725
106 667	16 217 524	405 438
160 000	20 814 265	520 357
213 333	24 848 026	621 201
266 667	28 508 965	712 724

Tabel 150: algemene overheadkosten bij pyrolyse bij enkel verkoop pyrolyse-olie

9.2.6 Verwerkingskosten cokes

Net zoals in paragraaf 7.3.6 wordt er in deze studie echter verondersteld dat de aangevoerde biomassa niet vervuild is met metalen. Hierdoor kunnen de cokes aangewend worden om het pyrolyseproces te voorzien van elektriciteit en warmte en zijn er geen verwerkingskosten.

9.2.7 Energiekosten

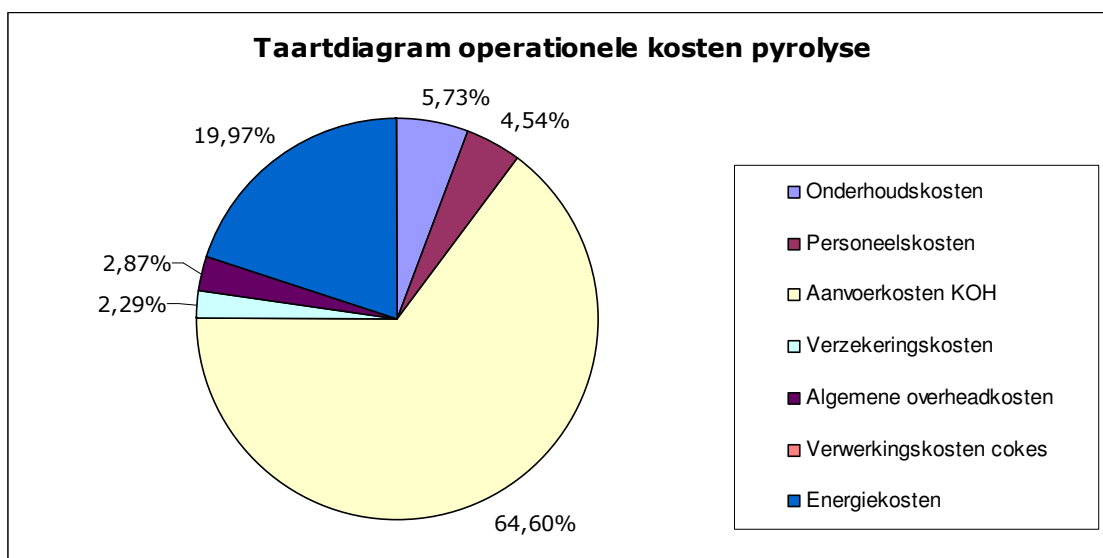
Aangezien er voorzien wordt in de elektriciteitsbehoefte van het proces door de verbranding van de cokes en het niet-condenseerbaar gas zijn de energiekosten even groot als in tabel 76.

Tabel 151 geeft een overzicht van de jaarlijkse operationele kosten van pyrolyse voor verschillende hoeveelheden aangevoerde biomassa.

Aantal ton droge stof biomassa M	26 667 (tds/ jaar)	53 333 (tds/ jaar)	106 667 (tds/ jaar)	160 000 (tds/ jaar)	213 333 (tds/ jaar)	266 667 (tds/ jaar)
Onderhoudskosten	345 872	529 450	810 876	1 040 713	1 242 401	1 425 448
Personeelskosten	312 000	468 000	624 000	728 000	832 000	936 000
Aanvoerkosten KOH	2 213 361	4 533 305	9 493 363	14 560 000	20 053 302	25 600 032
Verzekeringskosten	138 349	211 780	324 350	416 285	496 961	570 179
Algemene overheadkosten	172 936	264 725	405 438	520 357	621 201	712 724
Verwerkingskosten cokes	0	0	0	0	0	0
Energiekosten	740 009	1 479 991	2 960 009	4 440 000	5 919 991	7 400 009
Totale operationele kosten pyrolyse	3 922 527	7 487 251	14 618 036	21 705 355	29 165 856	36 644 392

Tabel 151: totale jaarlijkse operationele kosten pyrolyse bij enkel verkoop pyrolyse-olie

In onderstaande figuur wordt de relatieve bijdrage van de verschillende kostencategorieën aan de totale operationele kosten weergegeven. De berekeningen zijn gebeurd op basis van het gemiddelde van de verschillende vermogens. De aanvoerkosten van het korte omloophout vormen maar liefst 64,6% van de totale operationele kosten.



Figuur 30: taartdiagram operationele kosten bij pyrolyse voor de olie

9.3 Operationele opbrengsten

De enige operationele opbrengsten zijn de opbrengsten die voortvloeien uit de verkoop van de geproduceerde pyrolyse-olie. Op basis van gegevens van van Stijn (2008) veronderstellen we dat 70% van de aangevoerde biomassa wordt omgezet in pyrolyse-olie. Volgens Putsche *et al.* (2006), Van Swaaij en Wagenaar is de dichtheid van pyrolyse-olie 1 200 kg/ m³. Siemons (2005) hanteert een dichtheid tussen 1 100 kg/ m³ en 1 200 kg/ m³. Wij gaan uit van een dichtheid van pyrolyse-olie van 1 200 kg/ m³. In onderstaande tabel wordt de geproduceerde hoeveelheid pyrolyse-olie berekend op basis van de aangevoerde hoeveelheden biomassa.

Aantal ton droge stof biomassa M (tds/ jaar)	Geproduceerde pyrolyse-olie (ton/ jaar)	Geproduceerde pyrolyse-olie (liter/ jaar)
26 667	18 667	15 555 750
53 333	37 333	31 110 917
106 667	74 667	62 222 417
160 000	112 000	93 333 333
213 333	149 333	124 444 250
266 667	186 667	155 555 750

Tabel 152: geproduceerde hoeveelheid pyrolyse-olie

Op basis van de gegevens uit paragraaf 4.5 wordt een energie-inhoud van de pyrolyse-olie van 18 GJ/ 1000 liter verondersteld. De verkoopprijs van de pyrolyse-olie bedraagt 9 EUR/ GJ. (van Stijn, 2008) Verykios (2004) hanteert een verkoopprijs tussen 6 en 9,5\$ per GJ wat overeenkomt met respectievelijk 4,29 en 6,79 EUR per GJ (wisselkoers december 2008). Volgens Wagenaar is de verkoopprijs van pyrolyse-olie 150 EUR/ ton. Dit komt overeen met 10 EUR/ GJ. Tijdens de berekeningen wordt een verkoopprijs van 9 EUR/ GJ verondersteld.

Geproduceerde pyrolyse-olie (liter/ jaar)	Geproduceerde pyrolyse-olie (GJ/ jaar)	Opbrengsten uit verkoop pyrolyse-olie (EUR)
15 555 750	280 004	2 520 032
31 110 917	559 997	5 039 969
62 222 417	1 120 004	10 080 032
93 333 333	1 680 000	15 120 000
124 444 250	2 239 997	20 159 969
155 555 750	2 800 004	25 200 032

Tabel 153: opbrengsten uit verkoop pyrolyse-olie

9.4 NCW van pyrolyse

De netto contante waarde wordt opnieuw berekend met behulp van formule (2). Ook in dit scenario is de belastingsvoet b gelijk aan 33% en de kapitaalkost r na belastingen gelijk aan 6,7%. De levensduur n van het project is 20 jaar.

In tabel 154 worden de totale netto kasopbrengsten na belastingen berekend voor de verschillende hoeveelheden aangevoerde biomassa.

Aantal ton droge stof biomassa M	26 667 (tds/jaar)	53 333 (tds/jaar)	106 667 (tds/jaar)	160 000 (tds/jaar)	213 333 (tds/jaar)	266 667 (tds/jaar)
Kasopbrengsten Q_t (EUR)	2 520 032	5 039 969	10 080 032	15 120 000	20 159 969	25 200 032
Kaskosten Q_t (EUR)	3 922 527	7 487 251	14 618 036	21 705 355	29 165 856	36 644 392
Netto kasopbrengsten voor belastingen $(Q_t - Q_t)$ (EUR)	-1 402 495	-2 447 282	-4 538 004	-6 585 355	-9 005 887	-11 444 360
Netto kasopbrengsten na belastingen $(1-b) \times (Q_t - Q_t)$ (EUR)	-1 402 495	-2 447 282	-4 538 004	-6 585 355	-9 005 887	-11 444 360
Belastingenschild afschrijvingen $b \times (I_0/n)$ (EUR)	114 138	174 718	267 589	343 435	409 992	470 398
Totale netto kasopbrengsten na belastingen $(1-b) \times (Q_t - Q_t) + b \times (I_0/n)$ (EUR)	-1 288 357	-2 272 564	-4 270 415	-6 241 920	-8 595 895	-10 973 962

Tabel 154: berekening totale netto kasopbrengsten pyrolyse bij enkel verkoop pyrolyse-olie

De netto kasopbrengsten na belastingen zijn gelijk aan de netto kasopbrengsten voor belastingen. De kaskosten zijn immers groter dan de kasopbrengsten. (Mercken, 2004)
De netto contante waarde voor de verschillende flow ratio's wordt in onderstaande tabel weergegeven.

Aantal ton droge stof biomassa M (tds/ jaar)	NCW (EUR)
26 667	- 19 999 646
53 333	- 33 842 467
106 667	- 60 356 173
160 000	- 86 135 676
213 333	- 115 573 129
266 667	- 144 908 943

Tabel 155: netto contante waarde bij enkel verkoop pyrolyse-olie

Voor alle flow ratio's heeft dit investeringsproject een negatieve netto contante waarde. Het project kan dus niet aanvaard worden. Marinus van Stijn slaagt er in de Bio Oil Exploitation NV wel in om een positieve NCW te generen. Bij hem valt immers de aanvoerkost van de biomassa weg. In de installatie in Tessenderlo wordt er onder andere restafval als input voor de pyrolyse-installatie gebruikt. Van Stijn dient dit restafval niet aan te kopen, maar ontvangt er zelfs 40 EUR per ton voor. (Thewys en Kuppens, 2008) In hoofdstuk 11 wordt berekend hoeveel EUR de producent van de pyrolyse-olie dient te ontvangen voor de biomassa die hij tijdens zijn proces aanwendt, opdat de NCW gelijk is aan nul.

Hoofdstuk 10: Scenarioanalyse

In dit hoofdstuk worden enkele scenario's geïdentificeerd. In een eerste stap gaan we na hoeveel warmte er minimaal dient afgezet te worden opdat de NCW groter is dan nul. Daarna wordt het effect op de NCW onderzocht wanneer er verondersteld wordt dat het aangevoerde korte omloophout met metalen vervuild is.

10.1 Warmteafzet

Tot dusver werd er in deze studie van uit gegaan dat alle geproduceerde warmte wordt afgezet. Deze assumptie is echter niet realistisch, want de vraag naar warmte is seizoensgebonden. In de zomer is de vraag namelijk kleiner dan in de winter.

Eerst wordt er, zowel voor vergassing als pyrolyse, een installatie waarin er een gescheiden productie van elektriciteit plaatsvindt verondersteld. Vervolgens doen we eenzelfde analyse bij een WKK-installatie met een warmteafzet van 25, 50, 75 en 100%. We zullen onderzoeken vanaf welke warmteafzet het aantrekkelijk is om een investering te doen in een WKK-installatie, in plaats van in een installatie waarin er enkel elektriciteit wordt geproduceerd.

10.1.1 Scenario 1: gescheiden productie elektriciteit

In hoofdstuk 7 werd de NCW van een investering in een installatie waarin er enkel elektriciteit wordt geproduceerd berekend voor de volledige capaciteitsrange bij zowel vergassing als pyrolyse. Het gaat hier dus niet om een investering in een WKK-installatie. Wanneer er enkel elektriciteit wordt opgewekt is de NCW voor een kleine elektriciteitsoutput hoger bij pyrolyse dan bij vergassing. Vanaf een capaciteit van 20 MW_e is de NCW van vergassing het grootst.

Vermogen (MW_e)	NCW vergassing (EUR)	NCW pyrolyse (EUR)
5	- 3 294 578	452 964
10	7 741 888	8 298 796
20	36 272 086	24 367 719
30	71 643 951	42 236 070
40	106 668 357	58 620 106
50	146 006 467	75 452 474

Tabel 156: netto contante waarde vergassing en pyrolyse bij warmteafzet 0%

10.1.2 Scenario 2: warmteafzet 25%

In tegenstelling tot in scenario 1 wordt er in scenario 2, 3, 4 en 5 warmte afgezet. Bij deze scenario's is een investering in een WKK-installatie dus noodzakelijk. Er zijn enkele verschillen tussen de investering in een installatie zoals in scenario 1 en de investering in een installatie zoals in de andere scenario's.

De investeringskost in een WKK-installatie, voor zowel vergassing als voor pyrolyse, ligt namelijk hoger dan in een installatie waarin er enkel elektriciteit geproduceerd wordt. In hoofdstuk 8 werd immers duidelijk dat er bij een WKK-installatie een extra investering noodzakelijk is om de geproduceerde warmte te kunnen verdelen. Ook het verschil in elektrische efficiëntie tussen gescheiden productie van elektriciteit en de productie van elektriciteit en warmte in een WKK-installatie leidt tot verschillen in de investeringskost. De operationele kosten liggen voor zowel vergassing als voor pyrolyse hoger in scenario 2, 3, 4 en 5 dan in scenario 1. In scenario 1 loopt men echter de opbrengsten uit de verkopen van de geproduceerde warmte mis. Ook ontvangt men bij dit scenario geen warmtekrachtcertificaten.

De investeringskosten zijn voor alle scenario's waarin er warmte wordt afgezet even groot, net zoals de operationele kosten. Niet alle scenario's waarbij er sprake is van een warmtekrachtkoppeling komen in aanmerking voor een verhoogde investeringsaftrek en warmtekrachtcertificaten. Bij een relatief lage warmteafzet daalt het thermisch rendement, waardoor de investering niet altijd voldoet aan de voorwaarden die gesteld worden om deze steunmaatregelen te kunnen ontvangen. De grootte van de opbrengsten uit de verkoop van warmte hangt uiteraard af van de warmteafzet.

Zoals vermeld in paragraaf 8.3.5 dient men, om in aanmerking te komen voor de verhoogde investeringsaftrek, te voldoen aan volgende voorwaarden:

- 1) $a_E + 2/3 a_Q \geq 50\%$
- 2) $(a_E) / (a_E + a_Q) \geq 25\%$
- 3) $(a_Q) / (a_E + a_Q) \geq 25\%$

In scenario 2 is bij vergassing de elektrische efficiëntie 25% en de thermische efficiëntie 10%. Er wordt immers slechts een kwart van de geproduceerde warmte afgezet.

- 1) $0,25 + (2/3 * 0,10) = 31,67\% \leq 50\%$
- 2) $(0,25) / (0,25 + 0,10) = 74,43\% \geq 25\%$
- 3) $(0,10) / (0,25 + 0,10) = 28,57\% \geq 25\%$

Bij pyrolyse is de elektrische efficiëntie 20,42% en de thermische efficiëntie 12,5%. Ook hier wordt er slechts een kwart van de geproduceerde warmte afgezet.

- 1) $0,2042 + (2/3 * 0,125) = 28,75\% \leq 50\%$
- 2) $(0,2042) / (0,2042 + 0,125) = 62,03\% \geq 25\%$
- 3) $(0,125) / (0,2042 + 0,125) = 37,97\% \geq 25\%$

Zowel bij vergassing als bij pyrolyse wordt er niet voldaan aan de eerste voorwaarde en heeft men dus geen recht op de verhoogde investeringsaftrek.

Om in aanmerking te komen voor warmtekrachtcertificaten dient de WKK-installatie kwalitatief te zijn. Dit is het geval wanneer men een primaire energiebesparing (PEB) van minimaal 10% realiseert ten opzichte van de referentie-installaties voor gescheiden opwekking. Toepassing van formule (35) levert voor vergassing een PEB van -11,72% en voor pyrolyse een PEB van -5,29% op. In beide gevallen heeft men dus geen recht op warmtekrachtcertificaten.

In onderstaande tabel wordt de NCW voor scenario 2 weergegeven voor zowel vergassing als voor pyrolyse. Bij een vermogen dat kleiner is dan 20 MW_e is de NCW het grootst bij pyrolyse. Bij hogere vermogens is de NCW van vergassing het grootst. De reden hiervoor is dat bij hogere vermogens de hogere totale netto kasstromen na belastingen de hogere investeringskost van de WKK-vergassingsinstallatie compenseren. Bij vergassing is de NCW positief bij een vermogen van 30, 40 en 50 MW_e, bij pyrolyse is de NCW negatief bij alle vermogens. Opvallend is dat bij pyrolyse de NCW van een vermogen van 5 tot 30 MW_e stijgt en weer daalt vanaf een vermogen van 40 MW_e. De reden hiervoor is dat de totale investeringskosten voor de verdeling van warmte meer dan proportioneel toenemen en niet gecompenseerd kunnen worden door de jaarlijkse netto kasstromen die toenemen naarmate het vermogen van de installatie groter wordt.

Vermogen (MW _e)	NCW vergassing (EUR)	NCW pyrolyse (EUR)
5	- 10 346 919	- 6 123 485

10	- 7 616 200	- 5 603 089
20	- 1 028 362	- 3 846 780
30	8 920 697	- 1 915 344
40	20 475 789	- 2 336 727
50	30 413 926	- 2 409 058

Tabel 157: netto contante waarde vergassing en pyrolyse bij warmteafzet 25%

10.1.3 Scenario 3: warmteafzet 50%

Een investering in een WKK-installatie bij een warmteafzet van 50% komt zowel voor vergassing als voor pyrolyse niet in aanmerking voor de verhoogde investeringsaftrek. In beide gevallen wordt er immers niet aan de eerste voorwaarde voldaan.

De thermische efficiëntie voor vergassing is nu 20%. De elektrische efficiëntie blijft 25%. Invullen van deze gegevens in voorwaarde 1 levert het volgende op:

$$0,25 + (2/3 * 0,20) = 38,33\% \leq 50\%$$

Bij pyrolyse is de thermische efficiëntie nu 25%, de elektrische efficiëntie blijft 20,42%. Voorwaarde 1 wordt dan:

$$0,2024 + (2/3 * 0,25) = 36,9\% \leq 50\%$$

Bij vergassing is de PEB -3,03%, bij pyrolyse 9,43%. De WKK-installaties zijn dus niet kwalitatief waardoor men geen recht heeft op warmtekrachtcertificaten.

In vergelijking met scenario 2 liggen de opbrengsten uit de verkoop van warmte hoger. Het is dus niet verwonderlijk dat de NCW voor zowel vergassing als voor pyrolyse hoger ligt dan bij scenario 2 voor alle capaciteiten. Net zoals in scenario 2 is de netto contante waarde het hoogst bij pyrolyse voor een capaciteit van 5 tot 10 MW_e. Bij hogere capaciteiten is de NCW het hoogst bij vergassing. Zowel bij vergassing als bij pyrolyse is de NCW positief vanaf een vermogen van 20 MW_e.

Vermogen (MW _e)	NCW vergassing (EUR)	NCW pyrolyse (EUR)
5	- 8 312 286	- 4 307 575
10	- 3 546 934	- 1 968 726

20	7 110 171	2 656 416
30	21 128 496	8 985 204
40	36 752 854	12 195 640
50	50 760 258	15 757 673

Tabel 158: netto contante waarde vergassing en pyrolyse bij warmteafzet 50%

10.1.4 Scenario 4: warmteafzet 75%

Bij een warmteafzet van 75% komen beide installaties nog steeds niet in aanmerking voor de verhoogde investeringsaftrek.

Met een thermische efficiëntie van 30% en een elektrische efficiëntie van 25% wordt er voor de vergassingsinstallatie immers nog steeds niet voldaan aan de eerste voorwaarde.

$$0,25 + (2/3 * 0,30) = 45\% \leq 50\%$$

De PEB bij vergassing is 8,11%. De WKK-installatie is dus niet kwalitatief en komt niet in aanmerking voor warmtekrachtcertificaten.

Ook de pyrolyse-installatie komt niet in aanmerking voor de verhoogde investeringsaftrek. Met een thermische efficiëntie van 37,5% en een elektrische efficiëntie van 20,24% voldoet men immers niet aan de eerste voorwaarde.

$$0,2024 + (2/3 * 0,375) = 45,24\% \leq 50\%$$

De PEB bij pyrolyse is 20,54%, waardoor de WKK-installatie als kwalitatief kan beschouwd worden. Men komt in aanmerking voor warmtekrachtcertificaten.

De netto contante waarde ligt voor alle vermogens het hoogst bij pyrolyse. De belangrijkste reden hiervoor is dat men bij een warmteafzet van 75% warmtekrachtcertificaten ontvangt, terwijl dit bij vergassing niet het geval is. De NCW ligt voor beide technieken, dus ook voor vergassing, hoger dan in scenario 3.

Vermogen (MW _e)	NCW vergassing (EUR)	NCW pyrolyse (EUR)
5	- 6 277 653	1 853 755

10	522 333	10 356 475
20	15 248 703	26 541 286
30	33 336 295	45 958 261
40	53 029 919	61 491 358
50	71 106 589	77 378 591

Tabel 159: netto contante waarde vergassing en pyrolyse bij warmteafzet 75%

10.1.5 Scenario 5: warmteafzet 100%

Scenario 5 veronderstelt een warmteafzet van 100%. Dit is het scenario dat in hoofdstuk 8 werd besproken. De investering in een WKK-installatie, bij zowel vergassing als bij pyrolyse, komt hier in aanmerking voor de verhoogde investeringsaftrek en warmtekrachtcertificaten. De netto contante waarde voor beide gevallen wordt in onderstaande tabel weergegeven voor de verschillende vermogens.

Vermogen (MW _e)	NCW vergassing (EUR)	NCW pyrolyse (EUR)
5	989 724	7 607 044
10	14 804 738	21 743 803
20	43 431 672	48 347 783
30	75 358 854	79 691 161
40	108 807 435	106 353 617
50	140 631 537	133 358 305

Tabel 160: netto contante waarde vergassing en pyrolyse bij warmteafzet 100%

10.1.6 Algemeen besluit

Uit voorgaande analyse blijkt dat voor pyrolyse de hoogste netto contante waarde voor alle vermogens wordt bereikt bij scenario 5. Voor vergassing geeft scenario 5 de hoogste NCW bij een vermogen van 5 tot 40 MW_e. Bij een vermogen van 50 MW_e wordt de hoogste NCW in scenario 1 bereikt. Indien niet alle geproduceerde warmte verkocht wordt ligt de NCW bij vergassing voor alle vermogens lager dan in het scenario waarin er enkel elektriciteit verkocht wordt. Voor scenario 2, 3 en 4 wordt de extra investering in de distributie van warmte en de daaruit voortvloeiende hogere operationele kosten dus niet gecompenseerd door de extra inkomsten uit de verkoop van warmte. Bovendien komt men bij vergassing in geen van deze 3 scenario's in aanmerking voor de verhoogde investeringsaftrek en warmtekrachtcertificaten. Het is dus zeer de vraag of het de moeite is om een investering te doen in een WKK-vergassingsinstallatie aangezien een

warmteafzet van 100% onrealistisch is. Bij pyrolyse ligt de NCW in scenario 4 voor alle capaciteiten hoger dan de NCW in scenario 1. Bij een lagere warmteafzet is de NCW steeds kleiner dan in scenario 1. Investeren in een WKK-installatie, in plaats van in een installatie waarin er enkel elektriciteit wordt opgewekt, lijkt dus enkel aantrekkelijk te zijn bij een warmteafzet van minimum 75%.

Vermogen (MW_e)	Keuze gescheiden productie elektriciteit	Keuze bij 25% warmteafzet	Keuze bij 50% warmteafzet	Keuze bij 75% warmteafzet	Keuze bij 100% warmteafzet
5	Pyrolyse	Pyrolyse	Pyrolyse	Pyrolyse	Pyrolyse
10	Pyrolyse	Pyrolyse	Pyrolyse	Pyrolyse	Pyrolyse
20	Vergassing	Vergassing	Vergassing	Pyrolyse	Pyrolyse
30	Vergassing	Vergassing	Vergassing	Pyrolyse	Pyrolyse
40	Vergassing	Vergassing	Vergassing	Pyrolyse	Vergassing
50	Vergassing	Vergassing	Vergassing	Pyrolyse	Vergassing

Tabel 161: keuze tussen vergassing en pyrolyse bij verschillende percentages warmteafzet

Bij een vermogen van 5 en 10 MW_e is de NCW het hoogst bij pyrolyse, onafhankelijk van de hoeveelheid warmte die wordt afgezet. Wanneer de capaciteit van een installatie 20 of 30 MW_e is dan is pyrolyse het aantrekkelijkst vanaf een warmteafzet van 75%. Een vergassingsinstallatie met een vermogen van 40 of 50 MW_e is verkiesbaar boven een pyrolyse-installatie van hetzelfde vermogen, behalve wanneer er 75% van de geproduceerde warmte wordt afgezet. De reden hiervoor is dat men bij een warmteafzet van 75% enkel warmtekrachtcertificaten ontvangt bij pyrolyse en niet bij vergassing. Indien alle geproduceerde warmte wordt afgezet krijgt men bij beide technieken deze certificaten.

10.2 Vervuilde wilg

In deze paragraaf wordt de invloed nagegaan op de NCW wanneer de aangevoerde biomassa vervuild is met metalen. Het gaat hier dus om de situatie die in Hoofdstuk 1: Probleemstelling besproken werd.

10.2.1 Vervuilde wilg bij vergassing

Uit paragraaf 3.5 blijkt dat wanneer de aangevoerde wilg vervuild is met metalen er bij vergassing een extra investering dient gedaan te worden in een rookgasreiniger. Ondanks contact met Caroline Kerremans van Thenergo zijn we er niet in geslaagd om de kost van deze rookgasreiniger te berekenen. De totale investeringskosten van een gasmotor van 1,8 MW_e met rookgasreiniger nemen toe met 10,66% ten opzichte van een gasmotor zonder rookgasreiniger. Bij dezelfde gasmotor met rookgasreiniger nemen de onderhoudskosten toe met 23,08%. (Kroon *et al.*, 2000)

10.2.2 Vervuilde wilg bij pyrolyse

10.2.2.1 Scenario 1: vervuilde wilg bij pyrolyse bij gescheiden productie elektriciteit

Wanneer het aangevoerde korte omloophout vervuild is met metalen, kan het pyrolyseproces niet meer van elektriciteit voorzien worden door de verbranding van het niet-condenseerbaar gas en de cokes. In paragraaf 7.3.6 werd vermeld dat de verwerkingskosten van de cokes bestaan uit een kost van 75 EUR per ton voor het storten van de cokes op een stortplaats van categorie II en een heffing van 39 EUR per ton. De totale verwerkingskost per ton cokes is dus 114 EUR per ton. Om het aantal ton geproduceerde cokes te berekenen dient men het aantal ton gedroogde biomassa, dat wordt aangevoerd in de pyrolyse-installatie, te vermenigvuldigen met de factor 0,2. Dit is volgens Van Stijn (2008) het percentage van de cokes die ontstaan tijdens het pyrolyseproces ten opzichte van het aantal ton biomassa dat wordt aangevoerd. In onderstaande tabel worden de totale verwerkingskosten van de cokes berekend.

Vermogen pyrolyse-installatie (MW _e)	Aantal ton droge stof biomassa M (tds/ jaar)	Aantal ton cokes	Totale verwerkingskosten cokes (EUR)
5	26 667	5 333	607 962
10	53 333	10 667	1 216 038
20	106 667	21 333	2 431 962
30	160 000	32 000	3 648 000
40	213 333	42 667	4 864 038
50	266 667	53 333	6 079 962

Tabel 162: totale verwerkingskosten cokes

Aangezien het proces niet voorzien kan worden van elektriciteit door de verbranding van cokes heeft men de mogelijkheid om elektriciteit aan te kopen van het net of om de zelf geproduceerde elektriciteit aan te wenden. Wij opteren voor de tweede optie. Het gevolg hiervan is dat de afgezette hoeveelheid elektriciteit kleiner is dan de geproduceerde hoeveelheid elektriciteit. De totale opbrengsten uit de verkoop van elektriciteit dalen dus ten opzichte van tabel 80.

Vermogen pyrolyse-installatie (MW_e)	Totale hoeveelheid geproduceerde elektriciteit (kWh)	Totale hoeveelheid afgezette elektriciteit (kWh)	Prijs van 1 kWh elektriciteit (EUR)	Totale opbrengsten uit verkoop van elektriciteit (EUR)
5	35 000 000	32 883 320	0,05	1 644 166
10	70 000 000	65 766 680	0,05	3 288 334
20	140 000 000	131 533 320	0,05	6 576 666
30	210 000 000	197 300 000	0,05	9 865 000
40	280 000 000	263 066 680	0,05	13 153 334
50	350 000 000	328 833 320	0,05	16 441 666

Tabel 163: totale opbrengsten uit verkoop van geproduceerde elektriciteit

In onderstaande tabel wordt de NCW van pyrolyse weergegeven onder de nieuwe omstandigheden. We merken een grote daling op ten opzichte van tabel 156. Bij een vermogen van 5 en 10 MW_e is de NCW zelfs negatief.

Vermogen (MW_e)	NCW pyrolyse (EUR)
5	- 4 734 200
10	- 2 075 351
20	3 619 245
30	21 577 277
40	44 828 786
50	52 649 596

Tabel 164: netto contante waarde pyrolyse met vervuilde biomassa bij warmteafzet 0%

10.2.2.2 Scenario 2: vervuilde wilg bij pyrolyse bij warmteafzet 25%

Onderstaande tabel geeft de NCW weer voor een WKK-installatie bij pyrolyse van vervuilde wilg bij een warmteafzet van 25%. De NCW is lager dan in tabel 157 omwille van de verwerkingskost van de cokes en de lagere opbrengsten uit de verkoop van

elektriciteit. Ten opzichte van tabel 164 daalt de NCW voor de volledige vermogensrange omdat de hogere totale investeringskosten en operationele kosten niet gecompenseerd kunnen worden door de extra opbrengsten uit de verkoop van warmte.

Vermogen (MW _e)	NCW pyrolyse (EUR)
5	- 12 683 671
10	- 18 723 282
20	- 30 087 345
30	- 41 276 101
40	- 54 817 857
50	- 68 010 389

Tabel 165: netto contante waarde pyrolyse met vervuilde biomassa bij warmteafzet 25%

10.2.2.3 Scenario 3: vervuilde wilg bij pyrolyse bij warmteafzet 50%

Tabel 166 geeft de NCW weer bij een warmteafzet van 50%. De NCW is gestegen ten opzichte van tabel 165 omwille van de hogere opbrengsten uit de verkoop van warmte. De netto contante waarde is echter negatief voor de volledige vermogensrange.

Vermogen (MW _e)	NCW pyrolyse (EUR)
5	- 10 867 761
10	- 15 088 918
20	- 23 584 149
30	- 30 375 554
40	- 40 285 490
50	- 49 843 649

Tabel 166: netto contante waarde pyrolyse met vervuilde biomassa bij warmteafzet 50%

10.2.2.4 Scenario 4: vervuilde wilg bij pyrolyse bij warmteafzet 75%

De operationele opbrengsten nemen toe ten opzichte van paragraaf 10.2.2.3 omwille van de hogere opbrengsten uit de verkoop van warmte en de ontvangsten uit de verkoop van warmtekrachtcertificaten. De NCW is positief wanneer het vermogen van de WKK-installatie groter is dan 10 MW_e.

Vermogen (MW _e)	NCW pyrolyse (EUR)
5	- 4 706 431
10	- 2 763 718
20	300 721
30	6 597 504
40	9 010 228
50	11 777 268

Tabel 167: netto contante waarde pyrolyse met vervuilde biomassa bij warmteafzet 75%

10.2.2.5 Scenario 5: vervuilde wilg bij pyrolyse bij warmteafzet 100%

De NCW bij een warmteafzet van 100% wordt weergegeven in tabel 168 en is positief voor de volledige vermogensrange.

Vermogen (MW _e)	NCW pyrolyse (EUR)
5	1 046 858
10	8 623 611
20	22 107 218
30	40 330 404
40	53 872 487
50	67 756 982

Tabel 168: netto contante waarde pyrolyse met vervuilde biomassa bij warmteafzet 100%

10.2.2.6 Algemeen besluit

Indien de vervuilde wilg enkel wordt omgezet in elektriciteit is de NCW positief bij een vermogen van 20 MW_e of meer. Bij een warmteafzet van 25 of 50% is de NCW voor alle vermogens negatief. Indien 75% van de geproduceerde warmte wordt afgezet verkrijgt men een positieve NCW bij een vermogen dat gelijk is aan 20 MW_e of meer. Indien alle geproduceerde warmte wordt afgezet is de NCW steeds positief.

Wanneer niet alle geproduceerde warmte wordt afgezet is de NCW steeds kleiner dan bij gescheiden productie van elektriciteit, behalve bij een warmteafzet van 75% bij een vermogen van 5 MW_e. Indien er sprake is van biomassa die vervuild is met metalen is het dus zeer de vraag of het de moeite loont om een investering te doen in een WKK-installatie. Een warmteafzet van 100% is immers onrealistisch.

Hoofdstuk 11: Aanvoerkost korte omloophout en NCW

Uit figuren 12, 13, 22, 23 en 30 blijkt dat de aanvoerkosten van het korte omloophout steeds de grootste kostencategorie vormen van de totale operationele kosten. In deze paragraaf wordt de aanvoerkost van het korte omloophout berekend opdat de netto contante waarde gelijk is aan nul. De resultaten van deze berekening bij gescheiden productie van elektriciteit worden weergegeven in tabel 169. Bij gescheiden productie van elektriciteit varieert de aanvoerkost van het korte omloophout tussen 82 EUR per ton droge stof bij een vergassingsinstallatie van 5 MW_e en 91 EUR per ton droge stof bij een vergassingsinstallatie van 50 MW_e. Deze aanvoerkosten voor de verschillende vermogens bij gescheiden productie van elektriciteit bij vergassing vindt men terug in tabel 53.

Bij pyrolyse varieert de aanvoerkost bij een installatie waarin er enkel elektriciteit wordt opgewekt tussen 83 EUR per ton droge stof bij een installatie van 5 MW_e en 96 EUR per ton droge stof bij een installatie van 50 MW_e. Deze waarden en de waarden voor de andere vermogens vindt men terug in tabel 69.

Vermogen installatie (MW_e)	Aanvoerkost KOH (EUR/ tds) opdat NCW nul is bij vergassing	Aanvoerkost KOH (EUR/ tds) opdat NCW nul is bij pyrolyse
5	58,68228	85,337553
10	113,67978	106,413665
20	159,092804	120,438131
30	188,94213	127,327493
40	205,337687	131,814684
50	220,168685	134,9382225

Tabel 169: aanvoerkost korte omloophout opdat NCW nul is bij gescheiden productie elektriciteit

Voor zowel vergassing als pyrolyse neemt de aanvoerkost van het korte omloophout opdat de NCW nul is toe naarmate het vermogen van de installatie stijgt. In beide gevallen neemt immers de netto contante waarde toe wanneer het vermogen van de installatie groter wordt. Bij een vergassingsinstallatie van 5 MW_e is de aanvoerkost van het korte omloophout opdat de NCW gelijk is aan nul kleiner dan de aanvoerkost die in paragraaf 7.2.3 gebruikt werd. Dit is logisch, aangezien uit tabel 84 blijkt dat de NCW van deze installatie kleiner is dan nul. In dezelfde tabel stellen we vast dat de NCW voor pyrolyse groter is dan voor vergassing bij een installatie van 10 MW_e. Toch is de

aanvoerkost die de NCW aan nul gelijkstelt kleiner bij pyrolyse. De reden hiervoor is dat door de lagere totale elektrische efficiëntie er bij pyrolyse meer korte omloophout dient aangevoerd te worden om een bepaalde elektriciteitsoutput te genereren, waardoor een prijsverandering een grotere invloed heeft op de NCW dan bij vergassing. We kunnen dus stellen dat de prijsgevoeligheid het hoogst is bij pyrolyse. Dit laatste geldt ook voor alle andere capaciteiten. In de literatuur werd voor de aanvoerkost van het korte omloophout waarden gevonden tussen 10 en 160 EUR per ton droge stof. In het geval de aanvoerkost 160 EUR per ton droge stof bedraagt ontstaat voor vergassing een negatieve NCW bij een vermogen van 5, 10 en 20 MW_e. Bij pyrolyse is de NCW bij deze aanvoerkost negatief voor de volledige vermogensrange. Het is echter de vraag of een aanvoerkost van 160 EUR per ton droge stof realistisch is. Bij bijvoorbeeld een pyrolyse- of vergassingsinstallatie van 5 MW_e impliceert een aanvoerkost van 160 EUR per ton droge stof bijna een verdubbeling van de momenteel gehanteerde aanvoerkost.

In onderstaande tabel wordt de aanvoerkost van het korte omloophout waarbij de netto contante waarde nul is weergegeven voor zowel vergassing als pyrolyse bij een WKK-installatie, waarin alle geproduceerde warmte wordt afgezet. Bij productie in een dergelijke vergassingsinstallatie varieert de aanvoerkost van het korte omloophout tussen 83 EUR per ton droge stof bij een capaciteit van 5 MW_e en 96 EUR per ton droge stof bij een capaciteit van 50 MW_e. De aanvoerkosten voor de verschillende vermogens bij een WKK-vergassingsinstallatie vindt men terug in tabel 114. Bij pyrolyse varieert de aanvoerkost bij een WKK-installatie tussen 83 EUR per ton droge stof bij een capaciteit van 5 MW_e en 98 EUR per ton droge stof bij een capaciteit van 50 MW_e. Deze waarden en de waarden voor de andere vermogens vindt men terug in tabel 123.

Vermogen installatie (MW_e)	Aanvoerkost KOH (EUR/ tds) opdat NCW nul is bij vergassing	Aanvoerkost KOH (EUR/ tds) opdat NCW nul is bij pyrolyse
5	87,864385	113,53311
10	121,381835	129,63821
20	142,365482	138,5148651
30	153,730091	146,311171
40	160,847084	149,3605798
50	165,1188663	151,5277463

Tabel 170: aanvoerkost korte omloophout opdat NCW nul is bij WKK

De netto contante waarde is voor een vermogen van 5 tot en met 30 MW_e het hoogst bij pyrolyse. Toch stellen we vast dat bij een vermogen van 20 en 30 MW_e de aanvoerkost van het korte omloophout opdat de NCW gelijk is aan nul het laagst ligt bij pyrolyse. De reden hiervoor is dat de totale elektrische efficiëntie bij pyrolyse lager ligt dan bij vergassing, waardoor er dus meer wilg dient aangevoerd te worden om een bepaalde elektriciteitsoutput te genereren. Een prijsverandering heeft dus een grotere invloed op de NCW dan bij vergassing.

Ten slotte wordt in onderstaande tabel de aanvoerkost van het korte omloophout die de NCW gelijkstelt aan nul weergegeven voor de pyrolyse-installatie waarin er enkel pyrolyse-olie wordt geproduceerd.

Aantal ton droge stof biomassa M (tds/ jaar)	Aanvoerkost KOH (EUR/ ton) opdat NCW nul is
26 667	13,849573
53 333	26,492342
106 667	36,827899
160 000	41,3625115
213 333	44,0488435
266 667	45,8959732

Tabel 171: aanvoerkost korte omloophout opdat NCW nul is bij enkel verkoop pyrolyse-olie

Voor alle waarden van M ligt de aanvoerkost opdat de NCW gelijk is aan nul lager dan 50 EUR per ton droge stof. Om een positieve NCW te realiseren zou men dus een lagere prijs dienen te betalen dan de prijs die de landbouwer ontvangt voor het korte omloophout dat hij heeft geproduceerd. Bij zuivere biomassa is dit volstrekt onrealistisch, aangezien men ook rekening dient te houden met transport- en voorbehandelingskosten van het korte omloophout. Marinus van Stijn van de Bio Oil Exploitation NV verwerkt afval in zijn pyrolyse-installatie en produceert pyrolyse-olie. Hij slaagt erin om een positieve NCW te genereren, omdat hij geld ontvangt voor het afval dat hij in zijn pyrolyse-installatie aanvoert. In deze eindverhandeling bestaat de aangevoerde biomassa echter volledig uit zuiver korte omloophout en is het dus onrealistisch om te veronderstellen dat men geld ontvangt voor de zuivere biomassa die wordt aangevoerd.

Hoofdstuk 12: Sensitiviteitsanalyse

In dit hoofdstuk worden een aantal variabelen geïdentificeerd die een belangrijke invloed kunnen hebben op de netto contante waarde van een investering in respectievelijk vergassing of pyrolyse. Het gaat om volgende variabelen: de aanvoerkost van het korte omloophout, de totale investeringskosten, de verkoopprijs van warmte, de verkoopprijs van elektriciteit en het al dan niet verkrijgen van warmtekrachtcertificaten en groenestroomcertificaten. Vervolgens wordt berekend in welke mate een wijziging in de waarden van deze variabelen de netto contante waarde van het investeringsproject beïnvloedt.

De sensitiviteitsanalyse wordt eerst uitgevoerd bij vergassing en daarna bij pyrolyse en dit bij een capaciteit van 5 MW_e. Dit is de meest realistische dimensie aangezien uit paragraaf 6.2.2.2 bleek dat de beschikbaarheid van korte omloophout in Vlaanderen momenteel beperkt is. De analyse gebeurt bij een gescheiden productie van elektriciteit en bij een warmteafzet van 50%, 75% en 100%.

12.1 Identificatie variabelen

Uit figuren 12, 13, 22 en 23 blijkt dat de aanvoerkost van het korte omloophout steeds meer dan de helft uitmaakt van de totale jaarlijkse operationele kosten. We kunnen dus stellen dat deze variabele een grote invloed uitoefent op de netto contante waarde. Voor de aanvoerkost van het korte omloophout wordt in de literatuur een aanvoerkost van 10 EUR per ton droge stof tot 160 EUR per ton droge stof gevonden. In deze analyse wordt de standaardwaarde van de aanvoerkost uit de verschillende economische analyses met maximaal 50% verhoogd of verlaagd. De toename of afname van deze kost gebeurt in stappen van 10%.

In paragraaf 8.7 werd er vastgesteld dat de berekeningen van de totale investeringskosten op basis van ons theoretisch model sterk afwijken van de investeringskosten in de praktijk. In tabel 141 vindt men voor vergassing afwijkingen tot 50% en bij pyrolyse afwijkingen tot bijna 25% terug. Verder blijkt uit tabellen 62, 78, 120 en 129 dat zowel bij vergassing als bij pyrolyse de initiële investeringkost een groot

aandeel heeft in de totale kosten. Er wordt gekozen voor een maximale toename of afname in deze variabele van 50%. Er wordt opnieuw met stappen van 10% gewerkt.

De verkoopprijs van de geproduceerde warmte en elektriciteit worden mee opgenomen in de sensitiviteitsanalyse aangezien ze beiden gevoelig zijn voor variaties. In de literatuur werd een verkoopprijs van elektriciteit teruggevonden tussen 0,027 en 0,059 EUR per kilowattuur. In de economische analyse werd een verkoopprijs van 0,05 EUR per kilowattuur elektriciteit gehanteerd. De verkoopprijs van warmte varieert in de literatuur tussen 0,013 en 0,02 EUR per kilowattuur. Er werd een verkoopprijs van 0,02 EUR per kilowattuur warmte aangenomen. Voor beide variabelen lijkt op basis van deze gegevens een prijswijziging van maximaal 50% realistisch.

Uit figuur 25 tot 28 blijkt het belang van warmtekrachtcertificaten en groenestroomcertificaten voor de operationele opbrengsten en dus ook voor de netto contante waarde van de investering. Er wordt nagegaan met hoeveel beide steunmaatregelen mogen afnemen, in combinatie met een wijziging van de totale investeringskosten en in combinatie met een wijziging van de aanvoerkost van het korte omloophout, opdat de netto contante gelijk is aan nul. Deze analyse gebeurt enkel bij een warmteafzet van 100% aangezien de netto contante waarde hier voor beide technieken positief is en men bij deze warmteafzet bij zowel vergassing als bij pyrolyse in aanmerking komt voor warmtekrachtcertificaten.

12.2 Sensitiviteitsanalyse vergassing

12.2.1 Sensitiviteitsanalyse vergassing bij gescheiden productie elektriciteit

12.2.1.1 Totale investeringskosten en aanvoerkost korte omloophout

In de economische analyse is de aanvoerkost van het korte omloophout bij een vergassingsinstallatie van 5 MW_e onder standaardomstandigheden gelijk aan 82 EUR per ton droge stof. De totale investeringskosten bedragen 23 296 607 EUR.

In bijlage 3 vindt men de netto contante waarde terug van een investering in een vergassingsinstallatie van 5 MW_e wanneer de totale investeringskosten en de aanvoerkost van het korte omloophout met maximaal 50% toenemen of afnemen. De waarde in het vet gedrukt is de NCW die men verkrijgt wanneer alle variabelen hun standaardwaarde aannemen. Negatieve waarden staan in het cursief gedrukt.

Wanneer alle variabelen hun standaardwaarde aannemen is de NCW van de vergassingsinstallatie van 5 MW_e negatief. Een gezamenlijke toename van de totale investeringskosten en de aanvoerkost van het korte omloophout leidt tot een grotere negatieve netto contante waarde. Indien de totale investeringskosten met 10% of meer toenemen is de NCW altijd negatief, ongeacht de grootte van afname van de aanvoerkost van het korte omloophout. Een gezamenlijke afname van beide variabelen resulteert telkens in een positieve NCW. Bij een afname van de totale investeringskosten van 40% of meer is de NCW altijd groter dan nul, zelfs bij een toename van de aanvoerkost van het korte omloophout met 50%. Wanneer de totale investeringskosten hun standaardwaarde aannemen vindt men een positieve netto contante waarde terug wanneer de aanvoerkost van het korte omloophout met 30% of meer daalt. Wanneer de aanvoerkost gelijk is aan 82 EUR per ton droge stof is de NCW positief bij een daling van de totale investeringskosten van 20% of meer.

12.2.1.2 Aanvoerkost korte omloophout en verkoopprijs elektriciteit

De netto contante waarde is enkel positief bij een beperkte toename van de aanvoerkost van het korte omloophout in combinatie met een sterke toename van de verkoopprijs van elektriciteit of bij een beperkte afname van de verkoopprijs van elektriciteit in combinatie met een sterke daling van de aanvoerkost van het korte omloophout. Bij een constante aanvoerkost van 82 EUR per ton droge stof korte omloophout is de netto contante waarde groter dan nul bij een toename van de elektriciteitsprijs van 30% of meer. Wanneer de verkoopprijs van elektriciteit gelijk is aan 0,05 EUR per kilowattuur dient de aanvoerkost van het korte omloophout te dalen met 30% of meer opdat de netto contante waarde positief is.

12.2.1.3 Totale investeringskosten en verkoopprijs elektriciteit

Een gezamenlijke toename van de verkoopprijs van elektriciteit met 50% en van de totale investeringskosten met 10% resulteert in een positieve NCW. Bij een daling van de totale investeringskosten met 40% of meer is de netto contante waarde altijd positief, zelfs bij een verkoopprijs van elektriciteit van 0,025 EUR per kilowattuur. Wanneer de totale investeringskosten hun standaardwaarde aannemen volstaat een toename van de verkoopprijs van elektriciteit van minstens 30% om een positieve netto contante waarde te genereren. Bij een constante verkoopprijs van elektriciteit van 0,05 EUR per kilowattuur dienen de totale investeringskosten te dalen met minimum 20% opdat de netto contante waarde groter is dan nul.

12.2.2 Sensitiviteitsanalyse vergassing bij 50% warmteafzet

12.2.2.1 Totale investeringskosten en aanvoerkost korte omloophout

Bij een WKK-vergassingsinstallatie van 5 MW_e bedraagt de aanvoerkost van het korte omloophout 83 EUR per ton droge stof en de totale investeringskosten 26 208 130 EUR. In bijlage 3 wordt de NCW weergegeven voor een dergelijke investering wanneer beide variabelen toenemen of afnemen met maximaal 50%.

Aangezien de NCW negatief is wanneer alle variabelen hun standaardwaarde aannemen leidt een toename van beide variabelen steeds tot een negatieve NCW. Een halvering van de totale investeringskosten resulteert in een positieve netto contante waarde wanneer de aanvoerkost van het korte omloophout met minder dan 40% toeneemt. Bij een totale investeringskost die gelijk is aan zijn standaardwaarde dient de aanvoerkost van het korte omloophout te halveren indien men een positieve netto contante waarde wenst. Bij een constante aanvoerkost is de NCW positief bij een daling van de totale investeringskosten met 30% of meer.

12.2.2.2 Verkoopprijs warmte en verkoopprijs elektriciteit

De verkoopprijs van de geproduceerde elektriciteit die werd gehanteerd in de economische analyse bedraagt 0,05 EUR/ kWh, die van warmte 0,02 EUR/ kWh. In deze paragraaf wordt de invloed op de NCW nagegaan wanneer beide prijzen met maximaal 50% toenemen of afnemen.

Uit bijlage 3 blijkt dat enkel een verdubbeling van de verkoopprijs van warmte en elektriciteit tot een positieve netto contante waarde leidt. Bij alle andere combinaties van deze variabelen is de netto contante waarde negatief.

12.2.2.3 Aanvoerkost korte omloophout en verkoopprijs elektriciteit

Een toename van de aanvoerkost van het korte omloophout in combinatie met een toename van de verkoopprijs van elektriciteit leidt nooit tot een positieve NCW. Hetzelfde geldt bij een afname van beide variabelen. Enkel bij een constante verkoopprijs van elektriciteit van 0,05 EUR per kilowattuur en een halvering van de aanvoerkost korte omloophout vindt men een positieve netto contante waarde terug.

12.2.2.4 Aanvoerkost korte omloophout en verkoopprijs warmte

Ook hier is de netto contante waarde negatief bij een gezamenlijke toename of afname van beide parameters. Enkel bij een aanvoerkost van het korte omloophout van 41,5 EUR per ton droge stof en een verkoopprijs van warmte van 0,02 EUR per kilowattuur is de netto contante waarde positief.

12.2.2.5 Totale investeringskosten en verkoopprijs elektriciteit

Een toename van de totale investeringskosten leidt steeds tot een negatieve netto contante waarde. Men neemt pas een positieve NCW waar wanneer de totale investeringskosten met minstens 30% afnemen. Bij een verkoopprijs van elektriciteit van 0,05 EUR per kilowattuur dienen de totale investeringskosten met 30% of meer af te nemen opdat de NCW positief is. Indien de totale investeringskosten hun standaardwaarde aannemen is de NCW steeds negatief, zelfs wanneer de verkoopprijs van elektriciteit toeneemt tot 0,075 EUR per kilowattuur.

12.2.2.6 Totale investeringskosten en verkoopprijs warmte

Net zoals in de vorige paragraaf resulteert een toename van de totale investeringskosten steeds in een negatieve netto contante waarde. Bij een afname van de totale investeringskosten met 30% stellen we een positieve netto contante waarde vast bij een verkoopprijs van warmte van 0,018 EUR per kilowattuur of meer. Indien de totale investeringskosten met 40% of meer afnemen is de NCW steeds positief, zelfs bij een halvering van de verkoopprijs van elektriciteit.

12.2.3 Sensitiviteitsanalyse vergassing bij 75% warmteafzet

12.2.3.1 Totale investeringskosten en aanvoerkost korte omloophout

In bijlage 3 vindt men de netto contante waarde terug voor de verandering van de totale investeringskosten en de aanvoerkost van het korte omloophout met maximaal 50%.

Aangezien de NCW negatief is, bij vergassing bij 75% warmteafzet wanneer alle variabelen hun standaardwaarde aannemen, leidt een toename van beide variabelen steeds tot een negatieve NCW. Bij een totale investeringskost die gelijk is aan zijn standaardwaarde verkrijgt men een positieve netto contante waarde bij een afname van de aanvoerkost van het korte omloophout met 40% of meer. Bij een constante aanvoerkost van 83 EUR per ton droge stof is de NCW positief bij een daling van de totale investeringskosten van 30% of meer. Ook een daling van de totale investeringskosten met 10% in combinatie met een daling van de aanvoerkost van het korte omloophout met minimum 20% volstaat om een positieve netto contante waarde te verkrijgen. Een toename van de totale investeringskosten van 10% leidt steeds tot een negatieve netto contante waarde, zelfs bij een aanvoerkost van het korte omloophout van 41,5 EUR per ton droge stof. Wanneer de aanvoerkost van het korte omloophout toeneemt met 10% is de netto contante waarde positief wanneer de totale investeringskosten met minstens 30% afnemen.

12.2.3.2 Verkoopprijs warmte en verkoopprijs elektriciteit

Een gezamenlijke toename van de verkoopprijs van warmte met 50% en van de verkoopprijs van elektriciteit met minstens 30% resulteert in een positieve NCW. Dit

geldt ook voor een toename van de verkoopprijs van elektriciteit met 40% in combinatie met een toegenomen verkoopprijs van warmte met minstens 20%. Bij een constante verkoopprijs van warmte van 0,02 EUR per kilowattuur leidt een toename van de verkoopprijs van elektriciteit met 50% tot een positieve NCW. Een gezamenlijke afname van beide variabelen leidt steeds tot een negatieve netto contante waarde.

12.2.3.3 Aanvoerkost korte omloophout en verkoopprijs elektriciteit

Bij een toename van de aanvoerkost van het korte omloophout is de NCW steeds negatief. Enkel een afname van de verkoopprijs van elektriciteit met 10% in combinatie met een halvering van de aanvoerkost van het korte omloophout levert een positieve NCW op. Bij een constante aanvoerkost van het korte omloophout van 83 EUR per ton droge stof resulteert een verhoging van de verkoopprijs van elektriciteit tot 0,075 EUR per kilowattuur in een NCW die groter is dan nul. Indien de verkoopprijs van elektriciteit constant wordt gehouden op 0,05 EUR per kilowattuur is de NCW positief indien de aanvoerkost van het korte omloophout met 40% of meer afneemt.

12.2.3.4 Aanvoerkost korte omloophout en verkoopprijs warmte

Een toename van de aanvoerkost van het korte omloophout leidt steeds tot een negatieve NCW. Enkel een sterke daling van de aanvoerkost van het korte omloophout en een beperkte afname van de verkoopprijs van warmte resulteren in een positieve NCW. Indien de verkoopprijs van warmte gelijk is aan 0,02 EUR per kilowattuur dient de aanvoerkost van het korte omloophout af te nemen met 40% of meer opdat de netto contante waarde positief is. Bij een aanvoerkost van het korte omloophout van 83 EUR per ton droge stof is de netto contante waarde positief indien de verkoopprijs van warmte met maximaal 30% afneemt.

12.2.3.5 Totale investeringskosten en verkoopprijs elektriciteit

Een toename van de totale investeringskosten leidt steeds tot een negatieve netto contante waarde. Enkel bij een afname van de totale investeringskosten met 30% of meer verkrijgt men een positieve NCW. Ook wanneer de totale investeringskosten hun standaardwaarde aannemen en de verkoopprijs van elektriciteit toeneemt tot 0,075 EUR per kilowattuur is de NCW positief. Hetzelfde geldt voor een constante verkoopprijs van

elektriciteit van 0,05 EUR per kilowattuur in combinatie met een afname van de totale investeringskosten met 30% of meer.

12.2.3.6 Totale investeringskosten en verkoopprijs warmte

Opnieuw leidt een toename van de totale investeringskosten steeds tot een negatieve netto contante waarde. Indien de totale investeringskosten afnemen met 30% leidt dit tot een positieve NCW, behalve bij een halvering van de verkoopprijs van warmte. Bij een afname van de totale investeringskosten met 40% of meer is de NCW positief, ook bij een verkoopprijs van warmte van 0,01 EUR per kilowattuur. Indien de verkoopprijs van warmte gelijk is aan 0,02 EUR per kilowattuur dienen de totale investeringskosten met minstens 30% af te nemen indien men een positieve NCW wenst.

12.2.4 Sensitiviteitsanalyse vergassing bij 100% warmteafzet

12.2.4.1 Totale investeringskosten en aanvoerkost korte omloophout

In deze paragraaf wordt de invloed van een toename of afname van de totale investeringskosten en de aanvoerkost van het korte omloophout op de netto contante waarde onderzocht.

Een verhoging van de aanvoerkost van het korte omloophout met 10% resulteert enkel in een positieve netto contante waarde wanneer de totale investeringskosten met 10% of meer afnemen. Bij een toename van de totale investeringskosten met 10% is een daling van de aanvoerkost van het korte omloophout van minstens 20% vereist om een positieve NCW te genereren. Aangezien de netto contante waarde onder standaardomstandigheden groter is dan nul leidt een constante aanvoerkost van het korte omloophout steeds tot een positieve NCW wanneer de totale investeringskosten afnemen, net zoals een totale investeringskost die gelijk is aan zijn standaardwaarde in combinatie met een daling van de aanvoerkost van het korte omloophout. Om dezelfde reden resulteert een gezamenlijke afname van beide variabelen tot een positieve NCW.

12.2.4.2 Verkoopprijs warmte en verkoopprijs elektriciteit

Logischerwijze leidt een toename van beide variabelen tot een positieve NCW. Een daling van de verkoopprijs van elektriciteit met 10% of meer resulteert steeds in een negatieve netto contante waarde indien de verkoopprijs van warmte ook afneemt. Wanneer de verkoopprijs van elektriciteit gelijk is aan 0,05 EUR per kilowattuur is de NCW positief zolang de verkoopprijs van warmte niet kleiner wordt dan 0,018 EUR per kilowattuur. Bij een verkoopprijs van warmte van 0,02 EUR per kilowattuur is de NCW groter dan nul, zolang de verkoopprijs van elektriciteit niet daalt.

12.2.4.3 Aanvoerkost korte omloophout en verkoopprijs elektriciteit

Enkel bij een toename van de aanvoerkost van het korte omloophout met 50% is de NCW steeds negatief. Wanneer de verkoopprijs van elektriciteit zijn standaardwaarde van 0,05 EUR per kilowattuur aanneemt resulteert een stijging van de aanvoerkost van het korte omloophout met minstens 10% in een NCW die kleiner is dan nul. Indien de aanvoerkost van het korte omloophout gelijk is aan 83 EUR per ton droge stof is de NCW groter dan nul zolang de verkoopprijs van elektriciteit niet daalt.

12.2.4.4 Aanvoerkost korte omloophout en verkoopprijs warmte

Een toename van de aanvoerkost met 30% of meer kan niet gecompenseerd worden door het verhogen van de verkoopprijs van warmte tot 0,03 EUR per kilowattuur. Bij een aanvoerkost van 83 EUR per ton droge stof is de NCW negatief wanneer de verkoopprijs van warmte afneemt met 20% of meer. Indien de verkoopprijs van warmte gelijk is aan 0,02 EUR per kilowattuur volstaat een toename van de aanvoerkost van het korte omloophout met 10% opdat de NCW negatief is.

12.2.4.5 Totale investeringskosten en verkoopprijs elektriciteit

Bij een toename van de totale investeringskosten met 30% of meer is de netto contante waarde steeds negatief. Indien de totale investeringskosten met 10% toenemen volstaat een verhoging van de verkoopprijs van elektriciteit met 20% opdat de NCW positief is, bij een toename van de totale investeringskosten met 20% dient de verkoopprijs van elektriciteit te stijgen met 40% of meer alvorens de NCW groter is dan nul. Wanneer de

totale investeringskosten hun standaardwaarde aannemen resulteert een daling van de verkoopprijs van elektriciteit met 10% of meer tot een negatieve NCW. Bij een constante verkoopprijs van elektriciteit van 0,05 EUR per kilowattuur volstaat een toename van de totale investeringskosten met 10% om een negatieve NCW te verkrijgen.

12.2.4.6 Totale investeringskosten en verkoopprijs warmte

Een toename van de totale investeringskosten die groter is dan 10% resulteert steeds in een negatieve netto contante waarde. Indien de totale investeringskosten hun standaardwaarde aannemen verkrijgt men een negatieve netto contante waarde wanneer de verkoopprijs van warmte afneemt met 20% of meer. Bij een verkoopprijs van warmte van 0,02 EUR per kilowattuur zorgt een toename van de totale investeringskosten van 10% of meer voor een NCW die kleiner is dan nul.

12.2.4.7 Certificaten en totale investeringskosten

12.2.4.7.1 Groenestroomcertificaten en totale investeringskosten

Bij een afname van de groenestroomcertificaten met 25% dienen de totale investeringskosten te dalen met 20% of meer opdat de netto contante waarde positief is. Indien de groenestroomcertificaten afnemen met 50% is een halvering van de totale investeringskosten vereist opdat de NCW groter is dan nul. De netto contante waarde is steeds negatief bij een afname van de groenestroomcertificaten van 75% of meer.

12.2.4.7.2 Warmtekrachtcertificaten en totale investeringskosten

Indien de warmtekrachtcertificaten afnemen met 25, 50 of 75% dienen de totale investeringskosten met 10% of meer te dalen om een positieve netto contante waarde te verkrijgen. Wanneer de overheid beslist om het toekennen van warmtekrachtcertificaten volledig stop te zetten is een afname van de totale investeringskosten van 20% of meer vereist om een positieve NCW te genereren.

12.2.4.7.3 Groenestroomcertificaten, warmtekrachtcertificaten en totale investeringskosten

Enkel bij een afname van 25% van beide certificaten verkrijgt men een positieve netto contante waarde op voorwaarde dat de totale investeringskosten afnemen met minstens 30%. Bij een grotere afname van de certificaten is de netto contante waarde steeds negatief, zelfs bij een halvering van de totale investeringskosten.

12.2.4.8 Certificaten en aanvoerkost korte omloophout

12.2.4.8.1 Groenestroomcertificaten en aanvoerkost korte omloophout

Een gezamenlijke afname van de groenestroomcertificaten met 25% en de aanvoerkost van het korte omloophout met 40% of meer resulteert in een positieve netto contante waarde. Bij een afname van 50% of meer van de groenestroomcertificaten is de NCW steeds negatief.

12.2.4.8.2 Warmtekrachtcertificaten en aanvoerkost korte omloophout

Een afname van de warmtekrachtcertificaten met 25 of 50% wordt gecompenseerd door een daling van de aanvoerkost van het korte omloophout met 10% of meer. Bij een afname van de warmtekrachtcertificaten met 75% dient de aanvoerkost van het korte omloophout met minstens 20% te dalen opdat de netto contante waarde positief is. Wanneer het toekennen van deze certificaten volledig wordt stopgezet, leidt een afname van de totale investeringskosten met 30% of meer tot een NCW die groter is dan nul.

12.2.4.8.3 Groenestroomcertificaten, warmtekrachtcertificaten en aanvoerkost korte omloophout

Bij een gelijktijdige afname van beide certificaten is de netto contante waarde steeds negatief, behalve bij een afname van beide certificaten met 25% in combinatie met een halvering van de aanvoerkost van het korte omloophout.

12.3 Sensitiviteitsanalyse pyrolyse

12.3.1 Sensitiviteitsanalyse pyrolyse bij gescheiden productie elektriciteit

12.3.1.1 Totale investeringskosten en aanvoerkost korte omloophout

De aanvoerkost van het korte omloophout bedraagt 83 EUR per ton droge stof. De totale investeringskosten zijn 11 484 394 EUR. Net zoals bij vergassing worden beide variabelen met maximaal 50% gewijzigd.

Uit bijlage 4 leidt men af dat de netto contante waarde onder standaardomstandigheden positief is. Een gezamenlijke toename van beide variabelen met 10% of meer volstaat echter om een negatieve netto contante waarde te verkrijgen. Indien de totale investeringskosten met hetzelfde percentage toenemen als de aanvoerkost van het korte omloophout afneemt is de netto contante waarde steeds positief. Hetzelfde geldt wanneer de totale investeringskosten afnemen met hetzelfde percentage als de aanvoerkost van het korte omloophout toeneemt.

12.3.1.2 Aanvoerkost korte omloophout en verkoopprijs elektriciteit

Een gezamenlijke afname van beide variabelen met hetzelfde percentage resulteert steeds in een positieve NCW. Indien beide variabelen toenemen met 10% is de netto contante waarde positief, bij een gezamenlijke toename van beide parameters met 20, 30, 40 of 50% verkrijgt men een negatieve NCW. De toegenomen aanvoerkost van het korte omloophout kan dus niet gecompenseerd worden door een toename van de verkoopprijs van elektriciteit. Bij een aanvoerkost van het korte omloophout van 83 EUR per ton droge stof verkrijgt men een negatieve netto contante waarde wanneer de verkoopprijs van elektriciteit daalt met 10% of meer. Wanneer de verkoopprijs van elektriciteit gelijk is aan 0,05 EUR per kilowattuur leidt een toename van de aanvoerkost van het korte omloophout met 10% of meer tot een negatieve NCW.

12.3.1.3 Totale investeringskosten en verkoopprijs elektriciteit

Een gezamenlijke afname van beide variabelen met hetzelfde percentage resulteert steeds in een positieve NCW. Indien beide variabelen toenemen met 10% is de netto

contante waarde positief, bij een gezamenlijke toename van beide parameters met 20, 30, 40 of 50% verkrijgt men een negatieve NCW. De toegenomen totale investeringskosten kunnen dus niet gecompenseerd worden door een toename van de verkoopprijs van elektriciteit. Wanneer de totale investeringskosten hun standaardwaarde aannemen leidt een afname van de verkoopprijs van elektriciteit met 10% tot een negatieve NCW. Dit is ook het geval bij een constante verkoopprijs van elektriciteit van 0,05 EUR per kilowattuur en een toename van de totale investeringskosten met 10%.

12.3.2 Sensitiviteitsanalyse pyrolyse bij 50% warmteafzet

12.3.2.1 Totale investeringskosten en aanvoerkost korte omloophout

Bij een pyrolyse-installatie van 5 MW_e waarbij er zowel elektriciteit als warmte wordt geproduceerd bedraagt de aanvoerkost van het korte omloophout 83 EUR per ton droge stof en de totale investeringskosten 12 954 550 EUR. In bijlage 4 wordt de NCW weergegeven voor een dergelijke investering wanneer beide variabelen toenemen of afnemen met maximaal 50%.

Wanneer één van beide variabelen constant is, is de netto contante waarde groter dan nul wanneer de andere variabele met 30% of meer afneemt. Indien de totale investeringskosten met 10% toenemen dient de aanvoerkost van het korte omloophout met minimaal 30% te dalen opdat de NCW groter is dan nul. Bij een toename van de aanvoerkost van het korte omloophout van 10% is een daling van de totale investeringskosten van minstens 40% nodig om een positieve netto contante waarde te verkrijgen.

12.3.2.2 Verkoopprijs warmte en verkoopprijs elektriciteit

In deze paragraaf wordt de invloed op de NCW nagegaan wanneer de verkoopprijs van warmte en elektriciteit met maximaal 50% wijzigen.

Een toename van de verkoopprijs van warmte met 50% bij een verkoopprijs van elektriciteit van 0,05 EUR per kilowattuur resulteert niet in een positieve netto contante

waarde. De verkoopprijs van elektriciteit zou minstens met 20% moeten toenemen om toch een positieve NCW te bekomen. Wanneer de verkoopprijs van warmte constant wordt gehouden op 0,02 EUR per kilowattuur is de NCW positief bij een toename van de verkoopprijs van elektriciteit met 40% of meer. Bij een stijging van de verkoopprijs van elektriciteit van minstens 30% in combinatie met een stijging van de verkoopprijs van warmte van minstens 20% is de netto contante waarde groter dan nul.

12.3.2.3 Aanvoerkost korte omloophout en verkoopprijs elektriciteit

Een toename van de aanvoerkost van het korte omloophout leidt steeds tot een negatieve netto contante waarde, zelfs wanneer de verkoopprijs van elektriciteit wordt verhoogd tot 0,075 EUR per kilowattuur. Een beperkte afname van de verkoopprijs van elektriciteit kan daarentegen wel gecompenseerd worden door een sterke daling van de aanvoerkost van het korte omloophout. Bij een aanvoerkost van het korte omloophout van 83 EUR per ton droge stof verkrijgt men een positieve netto contante waarde wanneer de verkoopprijs van elektriciteit toeneemt met 40% of meer. Wanneer de verkoopprijs van elektriciteit gelijk is aan 0,05 EUR per kilowattuur is de NCW groter dan nul bij een afname van de aanvoerkost van het korte omloophout met 30% of meer.

12.3.2.4 Aanvoerkost korte omloophout en verkoopprijs warmte

Wanneer de aanvoerkost van het korte omloophout toeneemt is de netto contante waarde steeds negatief, zelfs bij een verkoopprijs van warmte van 0,03 EUR per kilowattuur. Een daling van de verkoopprijs van warmte leidt enkel tot een negatieve NCW wanneer de aanvoerkost van het korte omloophout met minder dan 30% afneemt.

12.3.2.5 Totale investeringskosten en verkoopprijs elektriciteit

Een toename van de totale investeringskosten leidt steeds tot een negatieve netto contante waarde, behalve wanneer de verkoopprijs van elektriciteit toeneemt tot 0,075 EUR per kilowattuur. Men verkrijgt ook een positieve NCW bij een beperkte afname van de verkoopprijs van elektriciteit in combinatie met een sterke afname van de totale investeringskosten. Bij een constante verkoopprijs van elektriciteit van 0,05 EUR per kilowattuur dienen de totale investeringskosten met 30% of meer af te nemen opdat de NCW positief is. Bij een totale investeringskost die gelijk is aan zijn standaardwaarde is

een toename van de verkoopprijs van elektriciteit van minstens 40% vereist opdat dat netto contante waarde groter is dan nul.

12.3.2.6 Totale investeringskosten en verkoopprijs warmte

Wanneer de totale investeringskosten toenemen is de netto contante waarde steeds negatief. Een lagere verkoopprijs van warmte in combinatie met een sterke daling van de totale investeringskosten resulteert in een positieve netto contante waarde. Bij een constante verkoopprijs van warmte van 0,02 EUR per kilowattuur dienen de totale investeringskosten met minstens 30% af te nemen om een positieve netto contante waarde te genereren. Indien de totale investeringskosten hun standaardwaarde aannemen is de netto contante waarde steeds negatief, zelfs bij de toename van de verkoopprijs van warmte tot 0,03 EUR per kilowattuur.

12.3.3 Sensitiviteitsanalyse pyrolyse bij 75% warmteafzet

12.3.3.1 Totale investeringskosten en aanvoerkost korte omloophout

In bijlage 4 wordt NCW weergegeven voor een verandering van de totale investeringskosten en de aanvoerkost van het korte omloophout met maximaal 50%.

Een toename van de aanvoerkost van het korte omloophout met 10% resulteert enkel in een positieve netto contante waarde wanneer de totale investeringskosten met minstens 10% dalen. Wanneer de totale investeringskosten met 10% toenemen is de netto contante waarde positief bij een aanvoerkost van het korte omloophout die kleiner is dan of gelijk is aan 83 EUR per ton droge stof. Dit laatste geldt ook bij een totale investeringskost die gelijk is aan de standaardwaarde. Indien de aanvoerkost van het korte omloophout gelijk is aan 83 EUR per ton droge stof dienen de totale investeringskosten met minder dan 20% toe te nemen indien men een positieve netto contante waarde wenst.

12.3.3.2 Verkoopprijs warmte en verkoopprijs elektriciteit

Een afname in de prijs van één van beide variabelen met minstens 20% in combinatie met een afname van de andere variabele met minstens 10% leidt tot een negatieve netto contante waarde. Ook een daling van de verkoopprijs van elektriciteit met minimum 20% bij een verkoopprijs van warmte van 0,02 EUR per kilowattuur of een daling van de verkoopprijs van warmte met minimum 40% bij een verkoopprijs van elektriciteit van 0,05 EUR per kilowattuur resulteren in een negatieve NCW.

12.3.3.3 Aanvoerkost korte omloophout en verkoopprijs elektriciteit

Wanneer de aanvoerkost met 40% of meer toeneemt is de netto contante steeds negatief. Een daling van de verkoopprijs van elektriciteit kan meestal gecompenseerd worden door een afname van de aanvoerkost van het korte omloophout. Enkel bij een sterke afname van de verkoopprijs van elektriciteit in combinatie met een beperkte afname van de aanvoerkost van het korte omloophout is dit niet het geval. Bij een aanvoerkost van het korte omloophout van 83 EUR per ton droge stof verkrijgt men een negatieve netto contante waarde wanneer de verkoopprijs van elektriciteit met 20% of meer afneemt. Wanneer de verkoopprijs van elektriciteit gelijk is aan 0,05 EUR per kilowattuur is de netto contante waarde groter dan nul bij een aanvoerkost van het korte omloophout die kleiner is dan of gelijk is aan 83 EUR per ton droge stof.

12.3.3.4 Aanvoerkost korte omloophout en verkoopprijs warmte

Een toename van de aanvoerkost van het korte omloophout met 30% of meer kan niet gecompenseerd worden door het verhogen van de verkoopprijs van warmte. Wanneer de aanvoerkost van het korte omloophout toeneemt met 20% is er een verhoging van de verkoopprijs van warmte van 50% vereist om een positieve NCW te genereren. Indien de verkoopprijs van warmte gelijk is aan 0,02 EUR per kilowattuur is de netto contante waarde negatief wanneer de aanvoerkost van het korte omloophout met 10% of meer toeneemt. Bij een aanvoerkost van 83 EUR per ton droge stof korte omloophout is de netto contante waarde positief zolang de verkoopprijs van warmte met minder dan 40% afneemt.

12.3.3.5 Totale investeringskosten en verkoopprijs elektriciteit

Wanneer de totale investeringskosten met 50% toenemen is de NCW steeds negatief. Een kleinere toename van deze investeringskosten kan gecompenseerd worden door het al dan niet sterk verhogen van de verkoopprijs van elektriciteit. Een sterke daling van de verkoopprijs van elektriciteit leidt tot een negatieve NCW wanneer de totale investeringskosten weinig dalen. Indien de totale investeringskosten de standaardwaarde aannemen verkrijgt men een negatieve netto contante waarde wanneer de verkoopprijs van elektriciteit met 20% of meer daalt. Bij een verkoopprijs van elektriciteit van 0,05 EUR per kilowattuur verkrijgt men een negatieve netto contante waarde wanneer de totale investeringskosten met 20% of meer toenemen.

12.3.3.6 Totale investeringskosten en verkoopprijs warmte

Indien de totale investeringskosten met 30% of meer toenemen is de netto contante waarde steeds negatief, zelfs bij een toename van de verkoopprijs van warmte tot 0,03 EUR per kilowattuur. Een gezamenlijke afname van beide variabelen leidt steeds tot een positieve NCW. Wanneer de totale investeringskosten de standaardwaarde aannemen is de NCW negatief bij een daling van de verkoopprijs van warmte van minstens 40%. Bij een verkoopprijs van warmte van 0,02 EUR per kilowattuur leidt een verhoging van de totale investeringskosten met 20% of meer tot een negatieve NCW.

12.3.4 Sensitiviteitsanalyse pyrolyse bij 100% warmteafzet

12.3.4.1 Totale investeringskosten en aanvoerkost korte omloophout

In deze paragraaf wordt de invloed van een toename of afname van de totale investeringskosten en de aanvoerkost van het korte omloophout op de netto contante waarde onderzocht.

Onder standaardomstandigheden is de netto contante waarde positief. Een toename van de totale investeringskosten in combinatie met een daling van de aanvoerkost van het korte omloophout leidt dus steeds tot een positieve netto contante waarde. Hetzelfde geldt voor een toename van de aanvoerkost van het korte omloophout in combinatie met

een afname van de totale investeringskosten, behalve in het geval dat de aanvoerkost korte omloophout met 50% toeneemt en de totale investeringskosten met 10% afnemen. Bij een constante aanvoerkost van het korte omloophout van 83 EUR per ton droge stof is de netto contante waarde negatief wanneer de totale investeringskosten toenemen met 50%. Indien de totale investeringskosten niet afwijken van de standaardwaarde is de netto contante waarde negatief wanneer de aanvoerkost van het korte omloophout met 40% of meer toeneemt.

12.3.4.2 Verkoopprijs warmte en verkoopprijs elektriciteit

Enkel bij grote gezamenlijke prijsdalingen van beide variabelen is de netto contante waarde negatief.

12.3.4.3 Aanvoerkost korte omloophout en verkoopprijs elektriciteit

De netto contante waarde is steeds groter dan nul, behalve bij een toename van de aanvoerkost van het korte omloophout van 50% in combinatie met de toename van de verkoopprijs van elektriciteit die kleiner is dan 30% en bij een verkoopprijs van elektriciteit van 0,05 EUR per kilowattuur in combinatie met de toename van de aanvoerkost van het korte omloophout van 40%.

12.3.4.4 Aanvoerkost korte omloophout en verkoopprijs warmte

De netto contante waarde is steeds groter dan nul, behalve bij een toename van de aanvoerkost van het korte omloophout van 50% in combinatie met de toename van de verkoopprijs van elektriciteit die kleiner is dan 40% en bij een verkoopprijs van warmte van 0,02 EUR per kilowattuur in combinatie met de toename van de aanvoerkost van het korte omloophout van 40%.

12.3.4.5 Totale investeringskosten en verkoopprijs elektriciteit

De netto contante waarde is steeds positief, behalve bij een verkoopprijs van elektriciteit van 0,05 EUR per kilowattuur in combinatie met een toename van de totale investeringskosten van 50%.

12.3.4.6 Totale investeringskosten en verkoopprijs warmte

De netto contante waarde is steeds positief, behalve bij een verkoopprijs van warmte van 0,02 of 0,022 EUR per kilowattuur in combinatie met een toename van de totale investeringskosten van 50%.

12.3.4.7 Certificaten en totale investeringskosten

12.3.4.7.1 Groenestroomcertificaten en totale investeringskosten

Een afname van de groenestroomcertificaten met 75% of meer leidt steeds tot een negatieve NCW, zelfs wanneer de totale investeringskosten gehalveerd worden. Bij een halvering van de groenestroomcertificaten is een daling van de totale investeringskosten van minstens 40% vereist opdat de NCW groter is dan nul. Indien de groenestroomcertificaten met 25% afnemen is de NCW positief indien de totale investeringskosten kleiner zijn dan of gelijk zijn aan hun standaardwaarde.

12.3.4.7.2 Warmtekrachtcertificaten en totale investeringskosten

Indien de warmtekrachtcertificaten verdwijnen is de NCW nog steeds positief indien de totale investeringskosten met 10% of meer afnemen. Bij een afname van de warmtekrachtcertificaten met 25% is de netto contante waarde groter dan nul zolang de totale investeringskosten met minder dan 40% toenemen. Bij een halvering van de warmtekrachtcertificaten mogen de totale investeringskosten met maximaal 20% toenemen om een positieve NCW te genereren. Bij de standaardwaarde van de totale investeringskosten is de NCW altijd groter dan nul, behalve wanneer de warmtekrachtcertificaten volledig verdwijnen.

12.3.4.7.3 Groenestroomcertificaten, warmtekrachtcertificaten en totale investeringskosten

Bij een afname van beide certificaten met 50% of meer is de netto contante waarde steeds negatief. Wanneer de afname gelijk is aan 25% is de NCW positief zolang de totale investeringskosten met 10% of meer afnemen.

12.3.4.8 Certificaten en aanvoerkost korte omloophout

12.3.4.8.1 Groenestroomcertificaten en aanvoerkost korte omloophout

Indien de groenestroomcertificaten met 75% of meer afnemen is de NCW steeds negatief, ook al daalt de aanvoerkost van het korte omloophout tot 41,5 EUR per ton droge stof. Bij een halvering van de groenestroomcertificaten dient de aanvoerkost van het korte omloophout met 30% of meer af te nemen opdat de NCW positief is. Wanneer de groenestroomcertificaten met 25% afnemen is de NCW groter dan nul zolang de aanvoerkost van het korte omloophout niet toeneemt.

12.3.4.8.2 Warmtekrachtcertificaten en aanvoerkost korte omloophout

Indien de aanvoerkost van het korte omloophout met 10% of meer afneemt verkrijgt men steeds een positieve netto contante waarde. Bij een afname van de groenestroomcertificaten met 25, 50 en 75% volstaat een toename van de aanvoerkost van het korte omloophout van respectievelijk 30, 20 en 10% opdat de NCW negatief is.

12.3.4.8.3 Groenestroomcertificaten, warmtekrachtcertificaten en aanvoerkost korte omloophout

Wanneer beide certificaten met 75% of meer afnemen resulteert dit steeds in een negatieve netto contante waarde. Bij een halvering van beide certificaten is de NCW enkel groter dan nul wanneer de aanvoerkost van het korte omloophout halveert. Indien beide certificaten met 25% afnemen is de NCW groter dan nul wanneer de aanvoerkost van het korte omloophout afneemt met 10% of meer.

12.4 Conclusie sensitiviteitsanalyse

Uit voorgaande analyse blijkt dat de totale investeringskosten en de aanvoerkost van het korte omloophout een grote invloed uitoefenen op de netto contante waarde. De invloed van een wijziging van de totale investeringskosten bij vergassing is echter groter dan die van de aanvoerkost van het korte omloophout. Bijvoorbeeld, bij een vergassingsinstallatie met een warmteafzet van 100% bedraagt het verschil in netto contante waarde tussen de maximale en minimale waarde van de totale

investeringskosten, wanneer de aanvoerkost van het korte omloophout constant wordt gehouden op 83 EUR per ton droge stof, maar liefst 29 135 829 EUR. Het verschil in netto contante waarde tussen de hoogste en laagste aanvoerkost van het korte omloophout bij een investeringskost van 26 208 130 EUR bedraagt slechts 16 887 455 EUR. Bij pyrolyse is de invloed van een wijziging van de aanvoerkost van het korte omloophout groter dan die van een wijziging van de totale investeringskosten. Zo is bijvoorbeeld bij een pyrolyse-installatie waarbij alle geproduceerde warmte wordt afgezet het verschil in netto contante waarde tussen de hoogste en laagste aanvoerkost van het korte omloophout 20 678 689 EUR wanneer de totale investeringskosten gelijk zijn aan 12 954 550 EUR. Het verschil in netto contante waarde tussen de hoogste en laagste totale investeringskosten bij een aanvoerkost van het korte omloophout van 83 EUR per ton droge stof is slechts 17 696 417 EUR. De reden waarom een wijziging van de totale investeringskosten meer invloed uitoefent op de netto contante waarde bij vergassing is dat bij deze techniek de totale investeringskosten hoger zijn dan bij pyrolyse. Hierdoor leidt eenzelfde procentuele verhoging of verlaging van deze totale investeringskosten bij vergassing tot een grotere absolute toename of afname van de netto contante waarde dan bij pyrolyse. Aangezien de elektrische efficiëntie bij vergassing steeds hoger is dan bij pyrolyse dient men bij pyrolyse meer korte omloophout aan te voeren dan bij vergassing om eenzelfde elektriciteitsoutput te genereren. Hierdoor heeft een wijziging van de aanvoerkost van het korte omloophout bij pyrolyse een grotere invloed op de netto contante waarde dan een wijziging van deze aanvoerkost bij vergassing.

Zowel bij vergassing als bij pyrolyse heeft een wijziging van de verkoopprijs van elektriciteit een grotere invloed op de netto contante waarde dan de verkoopprijs van warmte. Zo leidt, bijvoorbeeld bij een vergassingsinstallatie waarin alle geproduceerde warmte wordt afgezet, een verdrievoudiging van de verkoopprijs van elektriciteit van 0,025 naar 0,075 EUR per kilowattuur bij een constante verkoopprijs van warmte van 0,02 EUR per kilowattuur tot een verhoging van de netto contante waarde met 12 659 072 EUR. Een verdrievoudiging van de verkoopprijs van warmte van 0,01 naar 0,03 EUR per kilowattuur bij een constante verkoopprijs van elektriciteit van 0,05 EUR leidt slechts tot een toename van de netto contante waarde met 8 138 533 EUR.

Indien de overheid beslist om de groenestroomcertificaten samen met de warmtekrachtcertificaten niet meer uit te reiken resulteert dit bij een warmteafzet van 100% bij zowel vergassing als bij pyrolyse in een negatieve netto contante waarde.

Indien de totale investeringskosten en de aanvoerkost van het korte omloophout bij vergassing hun standaardwaarde aannemen, leidt zelfs een daling van 25% van een van beide certificaten telkens tot een negatieve NCW. Bij pyrolyse is dit niet het geval aangezien de NCW onder standaardomstandigheden veel groter is dan die bij vergassing. Toch is bij pyrolyse de NCW vaak enkel positief bij een sterke afname van de totale investeringskosten of de aanvoerkost van het korte omloophout. We kunnen dus stellen dat beide certificaten van groot belang zijn voor de rendabiliteit van de investering in vergassing of pyrolyse. Verder blijkt de invloed van groenestroomcertificaten op de netto contante waarde groter dan de invloed van warmtekrachtcertificaten. Dit wordt ook bevestigd door figuren 25 en 27.

Hoofdstuk 13: Externe effecten

Tot dusver werden tijdens de economische analyse enkel de private kosten en baten van de productie van energie uit korte omloophout in rekening gebracht. Tijdens dit proces treden er echter ook externe effecten of externaliteiten op. Dit zijn neveneffecten van de productie van een goed, die niet in aanmerking worden genomen in de marktprijzen. Men kan de externe effecten indelen in negatieve en positieve externe effecten. Wanneer de productie van een goed aanleiding geeft tot een schadelijk neveneffect dat de gemeenschap wordt opgelegd zonder dat dit effect wordt verrekend in de marktprijs, ontstaat er een negatief extern effect. Een positief extern effect geeft aanleiding tot een gunstig neveneffect voor de samenleving zonder in rekening gebracht te worden in de marktprijs. (De Borger en Van Poeck, 2004)

Ceunen (2008) vermeldt voor de verbranding van korte omloophout enkele negatieve externe effecten zoals emissies en bodemerrosie. We gaan er van uit dat deze negatieve externe effecten ook voorkomen bij de vergassing en de pyrolyse van korte omloophout.

Uit paragrafen 3.5 en 4.6 blijkt immers dat er tijdens de vergassing en de pyrolyse van korte omloophout stikstofoxiden (NO_x -en) vrijkomen. Stikstofoxiden die niet op natuurlijke wijze worden uitgestoten dragen bij tot de vorming van zure regen. Zure regen leidt op zijn beurt tot de aantasting van bossen, de verzuring van kalkarme meren en vennen en een daling van de landbouwopbrengst. (Martech) Ook de gezondheid van de mens wordt aangetast door NO_x -concentraties in de lucht. Lage concentraties leiden tot kortademigheid, vermoeidheid en misselijkheid. Bij hoge concentraties kunnen opzwellingen van weefsels in de keel en in de bovenste luchtwegen, verminderde zuurstofbevoorrading van de organen en vocht in de longen optreden. Volgens het International Agency for Research on Cancer zijn stikstofoxiden niet kankerverwekkend. (Verlaek)

In vergelijking met andere gewassen ligt er bij korte omloophout veel onbegroeide grond bloot tussen de aangeplante stekken. Op zandige bodems kan dit leiden tot winderosie met als gevolg schade aan nieuwe aanplantingen. Op hellende velden kan er erosie optreden ten gevolge van hevige regenval. (Department for Environment Food and Rural Affairs, 2004)

Een belangrijk positief extern effect dat men bij Ceunen (2008) terugvindt is de toename van de economische activiteit tengevolge van het multiplier effect waarbij de groei van een bedrijf in een bepaalde sector een gunstige invloed heeft op de groei van een bedrijf in een andere sector. Ook de verhoogde werkgelegenheid is een voorbeeld van een gunstig neveneffect van de vergassing of pyrolyse van korte omloophout voor de samenleving. Zo kwamen we in deze studie tot het besluit dat er bij een WKK-vergassingsinstallatie van 50 MW_e maar liefst 55 jobs gecreëerd worden. Bij pyrolyse zijn dit er 30. Ook voor het transport van het korte omloophout naar de pyrolyse- of vergassingsinstallatie dienen er jobs te worden gecreëerd. Een bemerking die hierbij gemaakt dient te worden is dat de extra werkgelegenheid, die gecreëerd wordt bij de productie van energie uit korte omloophout, mogelijk ten koste gaat van de werkgelegenheid bij de productie van energie uit fossiele brandstoffen.

Verder zien Ceunen (2008) en Ochelen en Putzeijs (2008) ook de vermeden CO₂-emissies als een positief extern effect. In wat volgt wordt dit positief extern effect gekwantificeerd in monetaire termen.

In paragraaf 2.2 werd vermeld dat energieteelten niet bijdragen aan de toename van de atmosferische CO₂-uitstoot. Ook Cogen Energy vermeldt dat de conversie van korte omloophout CO₂-neutraal is. In wat volgt wordt de externe baat berekend van het niet uitstoten van CO₂ voor een biomassa-installatie ten opzichte van een steenkoolcentrale. Er wordt verondersteld dat er in beide installaties elektriciteit wordt geproduceerd.

In tegenstelling tot bij een biomassa-installatie is er bij een steenkoolcentrale wel sprake van een netto CO₂-uitstoot. Een kolencentrale stoot 1 000 gram CO₂ uit per geproduceerde kilowattuur elektriciteit. (Van Acker, 2007) Gellynck (2003) vermeldt dat de CO₂-emissie van een steenkoolcentrale geschat wordt op 765 gram CO₂ per kilowattuur. Bij Faaij *et al.* (1998) vindt men een CO₂-emissie van 815 gram CO₂ per kilowattuur. Er wordt in het verdere verloop van deze paragraaf een CO₂-emissie van 860 gram per kilowattuur verondersteld. Deze waarde is het gemiddelde van de drie waarden die in de literatuur werden teruggevonden en komt overeen met 0,00086 ton CO₂ per kilowattuur.

Vervolgens wordt de schadekost van CO₂ bepaald. Dit is de kost voor de samenleving van de uitstoot van een bepaalde hoeveelheid CO₂. De Nocker *et al.* (2005) vermelden

een schadekost van 20 EUR per ton CO₂. Blom *et al.* (2007) spreken van een schadekost tussen 9 EUR en 50 EUR per ton CO₂ met een aanbevolen schadekost van 19 EUR per ton. Bij Annema en van den Brink (2007) vindt men een schadekost van 50 EUR per ton CO₂ terug. In de verdere berekeningen gaan we uit van een schadekost van 19 EUR per ton CO₂.

Voor een installatie met een vermogen van 5 MW_e wordt de jaarlijkse externe baat van een biomassa-installatie ten opzichte van een steenkoolcentrale als volgt berekend:

$$0,00086 \text{ (ton CO}_2\text{/ kWh)} * 19 \text{ (EUR/ ton CO}_2\text{)} * 35\,000\,000 \text{ kWh/ jaar} = 571\,900 \text{ EUR/ jaar}$$

In onderstaande tabel wordt dezelfde berekening gemaakt voor de andere vermogens. Ook de jaarlijks vermeden CO₂-emissie door elektriciteit te produceren in een biomassacentrale in plaats van in een kolencentrale wordt in deze tabel weergegeven.

Capaciteit biomassa-installatie (MW _e)	Capaciteit biomassa-installatie (kWh/ jaar)	Jaarlijks vermeden CO ₂ -emissie (ton)	Jaarlijkse externe baat biomassa-installatie ten opzichte van steenkoolcentrale (EUR)
5	35 000 000	30 100	571 900
10	70 000 000	60 200	1 143 800
20	140 000 000	120 400	2 287 600
30	210 000 000	180 600	3 431 400
40	280 000 000	240 800	4 575 200
50	350 000 000	301 000	5 719 000

Tabel 172: externe baat van biomassa-installatie ten opzichte van steenkoolcentrale bij zowel vergassing als pyrolyse

Deze cijfers gelden zowel voor vergassing als voor pyrolyse aangezien beide technieken CO₂-neutraal zijn. De berekeningen van Ceunen (2008) voor verbranding zijn gelijkaardig. Verbranding van biomassa is immers ook een CO₂-neutrale techniek.

Volgens de Federale Raad voor Duurzame Ontwikkeling (2008) is er voor de productie, omvorming en het transport van biomassa vaak een hoeveelheid fossiele energie nodig. Deze activiteiten gaan dus gepaard met een CO₂-uitstoot. In deze eindverhandeling dient het geogste korte omloophout van het veld naar de vergassingsinstallatie of de

pyrolyse-installatie te worden vervoerd. In wat volgt wordt de CO₂-uitstoot die gepaard gaat met dit transport berekend.

Uit het volgende praktijkvoorbeeld blijkt echter dat deze uitstoot te verwaarlozen is. In de biomassacentrale van Essent in het Nederlandse Cuijk worden er per jaar 250 000 ton houtsnippers verbrand. Hiermee wordt er jaarlijks 128 000 ton CO₂-uitstoot vermeden ten opzichte van een installatie gedreven met fossiele brandstof. Bij een capaciteit van 25 ton per vrachtwagen zijn er 10 000 ritten van gemiddeld 80 kilometer nodig om de biomassa naar de centrale in Cuijk te transporteren. Dit stemt overeen met een totale afstand van 800 000 kilometer. Bij een verbruik van 0,25 liter diesel per kilometer dient men 200 000 liter diesel te verstoken. Het verstoken van 1 liter diesel veroorzaakt een CO₂-uitstoot van 3,2 kg. In het totaal wordt er dus 640 ton CO₂ uitgestoten. Dit is slechts een half procent van de vermeden CO₂-uitstoot van de biomassacentrale ten opzichte van de centrale op fossiele brandstof. (Biomassa Stroomlijn, 2003)

In tabellen 173 en 174 wordt berekend hoe groot de CO₂-emissie is van het transport van het korte omloophout naar de pyrolyse- of vergassingsinstallatie waarin er enkel elektriciteit geproduceerd wordt. Het aantal ton droge stof biomassa dat aangevoerd dient te worden bij een bepaalde capaciteit is voor vergassing afkomstig uit tabel 10 en voor pyrolyse uit tabel 11. Het aantal ritten dat er per jaar afgelegd dient te worden verkrijgt men door de gegevens uit kolom 2 te delen door 25. Uit het praktijkvoorbeeld van de centrale in Cuijk blijkt immers dat de capaciteit van een vrachtwagen 25 ton is. Coenen *et al.* (2008) vermelden een capaciteit van 30 ton per vrachtwagen. De vervoersafstand per lading is voor vergassing afkomstig uit tabel 16 en voor pyrolyse uit tabel 17. Het gaat hier om de afstand die afgelegd dient te worden om eerst het korte omloophout op te gaan halen en het vervolgens af te leveren aan de pyrolyse- of vergassingsinstallatie. De totale afstand die er per jaar dient afgelegd te worden wordt berekend door het aantal ritten per jaar te vermenigvuldigen met de vervoersafstand per lading. Aangezien er per kilometer 0,25 liter diesel verstoekt wordt verkrijgt men de verstoekte hoeveelheid diesel per jaar door de totale afstand per jaar te delen door 4. Het verstoken van 1 liter diesel veroorzaakt een CO₂-uitstoot van 2,6 kg. (VZW Kilowattuur, 2005) Tijdens onze berekeningen wordt er echter een CO₂-uitstoot van 3,2 kg per liter verstoekte diesel gehanteerd. Dit is de waarde die gebruikt werd tijdens de berekeningen van het praktijkvoorbeeld van Essent in Cuijk. Door de verstoekte

hoeveelheid diesel per jaar te vermenigvuldigen met 3,2 verkrijgt men de jaarlijkse CO₂-uitstoot ten gevolge van het transport van het korte omloophout.

Capaciteit vergassingsinstallatie (MW _e)	Aantal ton droge stof biomassa M (tds/ jaar)	Aantal ritten per jaar	Vervoersafstand per lading (km)	Totale afstand per jaar (km)	Verstookte hoeveelheid diesel per jaar (l)	CO ₂ -uitstoot van transport KOH (ton/ jaar)
5	19 444	778	11,97	9 313	2 328	7,4
10	35 897	1 436	16,26	23 349	5 837	18,7
20	68 292	2 732	22,43	61 279	15 320	49,0
30	97 674	3 907	26,83	104 825	26 206	83,9
40	127 273	5 091	30,62	155 886	38 972	124,7
50	155 556	6 222	33,85	210 615	52 654	168,5

Tabel 173: berekening CO₂-uitstoot van transport korte omloophout naar vergassingsinstallatie

Capaciteit pyrolyseinstallatie (MW _e)	Aantal ton droge stof biomassa M (tds/ jaar)	Aantal ritten per jaar	Vervoersafstand per lading (km)	Totale afstand per jaar (km)	Verstookte hoeveelheid diesel per jaar (l)	CO ₂ -uitstoot van transport KOH (ton/jaar)
5	26 667	1 067	14,02	14 959	3 740	12,0
10	53 333	2 133	19,82	42 276	10 569	33,8
20	106 667	4 267	28,03	119 604	29 901	95,7
30	160 000	6 400	34,34	219 776	54 944	175,8
40	213 333	8 533	39,65	338 333	84 583	270,7
50	266 667	10 667	45,42	484 495	121 124	387,6

Tabel 174: berekening CO₂-uitstoot van transport korte omloophout naar pyrolyse-installatie

Een vergelijking van tabellen 173 en 174 met tabel 172 leert ons dat de CO₂-uitstoot, die ontstaat tijdens het transport van het korte omloophout ten opzichte van de vermeden CO₂-emissie door de productie van elektriciteit in een biomassacentrale in plaats van in een kolencentrale, verwaarloosbaar klein is. Zo wordt er bij een vergassingsinstallatie van 50 MW_e bijvoorbeeld 168,5 ton CO₂ uitgestoten, terwijl de vermeden CO₂-emissie 301 000 ton bedraagt. De CO₂-emissie tijdens het transport van het korte omloophout is dus slechts 0,06% ten opzichte van de vermeden CO₂-emissie. Bij een pyrolyseinstallatie van hetzelfde vermogen is dit 0,13%.

Het aandeel van kernenergie in de totale elektriciteitsproductie in België is 55%. (Nucleair Forum, 2009) Kernenergie wordt net zoals de energie die opgewekt wordt uit biomassa als een CO₂-neutrale energiebron aanzien. Deze stelling leidt echter tot veel controverse. Volgens Lievens (2007) komen er immers grote hoeveelheden CO₂ vrij tijdens de ontginning, de verscheping en de verwerking van uranium. Verder leiden het onderhoud van de infrastructuur en de verwijdering en de verwerking van het kernafval tot CO₂-emissies. Helaas zijn er geen precieze gegevens terug te vinden over de hoeveelheid CO₂ die vrijkomt tijdens deze activiteiten waardoor een vergelijking met energie uit korte omloophout onmogelijk is. Lievens (2007) vermeldt wel dat in Frankrijk kernenergie verantwoordelijk is voor maar liefst 10% van de totale CO₂-uitstoot.

Een derde positief extern effect doet zich voor wanneer er korte omloophout wordt aangeplant op een met zware metalen vervuild gebied. In hoofdstuk 1: Probleemstelling werd vermeld dat korte omloophout door zijn hoog accumulatievermogen in staat is om de in de bodem aanwezige zware metalen op te nemen. Het gevolg hiervan is een metaalvrije bodem. Op deze bodem kan de landbouwer opnieuw groenten telen, waardoor zijn arbeidsinkomen stijgt. Bovendien neemt de kans op gezondheidsschade door metaalvervuiling sterk af, terwijl de waarde van de landbouwgrond toeneemt. Dit alles kan aanzien worden als een positief neveneffect van de productie van energie uit met zware metalen vervuild korte omloophout.

Hoofdstuk 14: Algemene conclusies en aanbevelingen

14.1 Vergelijkende analyse

In deze analyse worden stap voor stap de verschillende componenten die de NCW bepalen besproken en vergeleken voor vergassing en pyrolyse en dit bij een installatie waarin er enkel elektriciteit wordt geproduceerd en bij een WKK-installatie met een warmteafzet van 50% en 100%.

14.1.1 De initiële investering

Voor vergassing gebeurt er in deze studie een investering in een atmosferische wervelbedvergasser en een STEG-centrale. Bij pyrolyse bestaat de investeringskost uit de totale investeringskosten van het eigenlijke pyrolyseproces, de opslagkosten van de pyrolyse-olie en de investeringskosten van de dieselmotor. Indien men ook warmte wenst te produceren wordt bij beide technieken de investeringskost verhoogd met de kosten voor de verdeling van warmte.

Uit tabel 26 en tabel 34 blijkt dat de vergassingsinstallatie, waarin er enkel elektriciteit wordt geproduceerd, voor alle capaciteiten een investeringskost heeft die ongeveer dubbel zo groot is als die van de pyrolyse-installatie. Bij beide installaties is er sprake van schaalvoordelen, zoals af te leiden is uit figuur 9 en 11. Bij een vergassingsinstallatie van 5 MW_e bedragen de investeringskosten 4 659 321 EUR per MW_e, bij een installatie van 50 MW_e is dit slechts 2 163 634 EUR per MW_e. Een pyrolyse-installatie van 5 MW_e heeft een investeringskost van 2 296 879 EUR per MW_e, terwijl een installatie van 50 MW_e een investeringskost van 1 122 203 EUR per MW_e heeft.

In tabel 94 vindt men de totale investeringskosten van een WKK-installatie voor vergassing terug. Deze investeringskosten zijn gestegen ten opzichte van tabel 26. Deze toename is gedeeltelijk te wijten aan het feit dat de elektrische efficiëntie bij een WKK-installatie een stuk lager ligt dan bij een gewone vergassingsinstallatie waarin er geen warmte wordt geproduceerd. Dit heeft onder andere tot gevolg dat er machines nodig zijn die een grotere hoeveelheid korte omloophout per jaar kunnen verwerken waardoor de totale investeringskosten toenemen. Verder worden de totale investeringskosten

verhoogd met de kosten voor warmteverdeling. In onderstaande tabel wordt weergegeven voor welk deel van de toename van de totale investeringskosten de verdeling van warmte en de wijziging van de elektrische efficiëntie verantwoordelijk zijn. De percentuele toename van de totale investeringskosten stijgt naarmate het vermogen van de vergassingsinstallatie toeneemt. De reden hiervoor is dat de totale investeringskosten ten gevolge van warmteverdeling progressief toenemen met het vermogen van de installatie.

Vermogen vergassings-installatie (MW_e)	Toename investeringskost (EUR) door wijziging elektr. efficiëntie	Toename totale investeringskosten (EUR) ten gevolge van warmteverdeling	Totale toename van totale investeringskosten (EUR)	Percentuele toename totale investeringskosten
5	2 539 703	371 820	2 911 523	12,50
10	5 353 862	1 051 665	6 405 527	17,72
20	10 484 912	2 974 558	13 459 470	23,40
30	16 008 703	5 464 612	21 473 315	28,38
40	20 380 944	8 413 320	28 794 264	30,90
50	26 282 255	11 757 973	38 040 228	35,16

Tabel 175: toename totale investeringskosten vergassing bij WKK in vergelijking met elektriciteitsproductie

In tabel 100 vindt men de totale investeringskosten in een WKK-installatie voor pyrolyse terug. Deze investeringskosten zijn gestegen ten opzichte van tabel 34. De toename in de totale investeringskosten voor de WKK-installatie is opnieuw te verklaren door twee wijzigingen. Ten eerste daalt de elektrische efficiëntie van de pyrolyse-olie naar elektriciteit waardoor ook de totale elektrische efficiëntie van het korte omloophout naar elektriciteit kleiner wordt. Dit heeft tot gevolg dat de totale investeringskosten toenemen. Ten tweede worden de totale investeringskosten, net zoals bij vergassing, verhoogd met de kosten voor warmteverdeling. In tabel 176 wordt weergegeven voor welk deel van de toename van de totale investeringskosten de afzet van warmte en de wijziging van de elektrische efficiëntie verantwoordelijk zijn. De percentuele toename van de totale investeringskosten stijgt naarmate het vermogen van de pyrolyse-installatie toeneemt. De reden hiervoor is dat de totale investeringskosten ten gevolge van warmteverdeling progressief toenemen met het vermogen van de installatie.

Vermogen pyrolyse- installatie (MW_e)	Toename investeringskost (EUR) door wijziging elektr. efficiëntie	Toename totale investeringskosten (EUR) ten gevolge van warmteverdeling	Totale toename van totale investeringskosten (EUR)	Percentuele toename totale investerings- kosten
5	1 156 651	313 505	1 470 156	12,8
10	1 773 241	887 658	2 660 899	14,43
20	2 707 621	2 124 680	4 832 301	16,27
30	3 481 952	4 610 794	8 092 746	20,58
40	4 152 156	7 097 540	11 249 696	23,42
50	4 769 396	9 920 155	14 689 551	26,18

Tabel 176: toename totale investeringskosten pyrolyse bij WKK in vergelijking met elektriciteitsproductie

Uit tabel 175 en 176 stellen we vast dat de absolute toename van de totale investeringskosten bij vergassing veel groter is dan bij pyrolyse. Bij vergassing is deze toename grotendeels te verklaren door een lagere elektrische efficiëntie bij de WKK-installatie. Bij pyrolyse is bij een vermogen van 5 tot 20 MW_e de daling van de totale elektrische efficiëntie het meest verantwoordelijk voor de toename. Bij grotere vermogens nemen de totale investeringskosten vooral toe omwille van de extra kost voor warmteverdeling.

Uit het voorgaande blijkt dat voor de volledige vermogensrange de totale investeringskosten in de WKK-installatie bij vergassing nog steeds groter zijn dan bij pyrolyse. Ten opzichte van de investeringskosten bij gescheiden productie van elektriciteit zijn de investeringskosten bij vergassing immers nog meer toegenomen dan bij pyrolyse. De totale investeringskosten zijn voor beide technieken even groot bij een warmteafzet van 50% als bij een warmteafzet van 100%. De installatie wordt immers gebouwd in de veronderstelling dat men erin slaagt om alle geproduceerde warmte afgezet te krijgen. Het is echter mogelijk dat de warmteafzet tegenvalt en bijvoorbeeld beperkt is tot 50%.

Ondanks dat de investeringskost voor de verdeling van warmte progressief toeneemt zijn er bij de totale investeringskosten van beide installaties nog steeds schaalvoordelen waar te nemen. Een WKK-vergassingsinstallatie van 5 MW_e heeft een investeringskost van 5 241 626 EUR per MW_e, terwijl een dergelijke installatie van 50 MW_e een investeringskost van 2 924 439 EUR per MW_e heeft. Bij een pyrolyse-installatie waarin er zowel elektriciteit als warmte wordt geproduceerd is de investeringskost bij een

installatie van 5 MW_e per MW_e 2 590 910 EUR. Een installatie van 50 MW_e heeft een investeringskost per MW_e van 1 415 994 EUR.

Bij vergassing wordt zowel bij gescheiden productie van elektriciteit als bij een warmtekrachtkoppeling de maximale ecologiepremie ontvangen voor alle vermogens. Voor pyrolyse wordt de maximale ecologiepremie bereikt vanaf een capaciteit van 10 MW_e bij zowel gescheiden productie van elektriciteit als bij een WKK-installatie. Aan de eigenaar van de vergassingsinstallatie wordt een grotere verhoogde investeringsaftrek toegekend dan aan de eigenaar van een pyrolyse-installatie. Dit geldt wanneer er enkel elektriciteit wordt opgewekt en bij een warmteafzet van 100%. Wanneer slechts de helft van de geproduceerde warmte wordt afgezet komt het investeringsproject niet in aanmerking voor een verhoogde investeringsaftrek bij zowel vergassing als pyrolyse.

14.1.2 De operationele kosten

Wanneer er enkel elektriciteit wordt geproduceerd zijn de jaarlijkse operationele kosten van pyrolyse voor de volledige capaciteitsrange groter dan bij vergassing. Doordat de totale elektrische efficiëntie bij pyrolyse kleiner is dan bij vergassing zijn de aanvoerkosten van het korte omloophout het grootst bij pyrolyse. Verder zijn de energiekosten bij pyrolyse aanzienlijk groter dan bij vergassing omwille van de grote hoeveelheid koelwater dat tijdens het proces wordt aangewend.

De operationele kosten van de WKK-installatie bij vergassing nemen toe ten opzichte van deze bij gescheiden productie van elektriciteit. Doordat de investeringskosten stijgen worden ook de onderhoudskosten, de verzekeringskosten en de algemene overheadkosten groter, aangezien zij variëren met de totale investeringskosten. Aangezien de elektrische efficiëntie bij de WKK-installatie is gedaald dient er een grotere hoeveelheid biomassa aangevoerd te worden om een bepaalde elektriciteitsoutput te genereren. Hierdoor worden de aanvoerkosten van het korte omloophout groter, net zoals de personeelskosten, de energiekosten en de transport- en behandelingskosten van de assen. Ook de operationele kosten van de warmtekrachtkoppeling bij pyrolyse stijgen, echter in mindere mate dan bij vergassing. Hiervoor zijn er twee redenen. Ten eerste is er bij pyrolyse een kleinere daling van de totale elektrische efficiëntie, ten opzichte van wanneer men enkel elektriciteit opwekt, dan bij vergassing. Hierdoor is er dus een minder grote toename in de hoeveelheid biomassa die dient aangevoerd te worden,

waardoor de kosten die hiermee variëren minder sterk toenemen. Ten tweede blijkt uit tabel 175 en 176 dat de toename van de totale investeringskosten bij pyrolyse minder groot is dan bij vergassing. Dit heeft tot gevolg dat de kosten die variëren met de totale investeringskosten minder sterk toenemen bij vergassing.

De operationele kosten van pyrolyse zijn dus nog steeds groter dan die van vergassing, maar het verschil is kleiner geworden ten opzichte van het scenario waarin er enkel elektriciteit wordt geproduceerd. Aangezien de hoeveelheid warmte die men afgezet krijgt de grootte van de operationele kosten niet beïnvloedt zijn deze kosten even groot bij een WKK-installatie met een warmteafzet van 50% als bij een warmteafzet van 100%. Dit geldt zowel bij vergassing als pyrolyse.

Ook bij de operationele kosten zijn er zowel bij vergassing als bij pyrolyse schaalvoordelen weer te nemen. Het gaat hier om de kosten die variëren met de totale investeringskosten en om de personeelskosten. Het aantal werknemers per MW_e daalt immers naarmate het vermogen van de installatie toeneemt.

14.1.3 De operationele opbrengsten

Wanneer er enkel elektriciteit wordt geproduceerd bestaan de jaarlijkse operationele opbrengsten uit de opbrengsten uit de verkoop van elektriciteit en groenestroomcertificaten. De opbrengsten uit de verkoop van elektriciteit zijn voor alle vermogens het grootst bij pyrolyse. Bij vergassing wordt immers een deel van de geproduceerde elektriciteit aangewend om het eigen proces van elektriciteit te voorzien. Dit is niet het geval bij pyrolyse. Het pyrolyseproces wordt namelijk voorzien van elektriciteit door de verbranding van de geproduceerde cokes en het niet-condenseerbaar gas.

Wanneer er naast elektriciteit ook warmte wordt geproduceerd bestaan de jaarlijkse operationele opbrengsten uit de opbrengsten uit de verkoop van elektriciteit, warmte, groenestroomcertificaten en warmtekrachtcertificaten. De opbrengsten uit de verkoop van elektriciteit en groenestroomcertificaten zijn voor zowel vergassing als voor pyrolyse even groot als in het scenario waarin er enkel elektriciteit wordt geproduceerd. Bij vergassing zijn de opbrengsten uit de verkoop van warmte groter dan bij pyrolyse. Ondanks de lagere elektrische efficiëntie is de warmteproductie bij vergassing immers

het hoogst. De primaire energiebesparing is daarentegen het grootst bij pyrolyse, waardoor de opbrengsten uit de verkoop van warmtekrachtcertificaten groter zijn dan bij vergassing. Bij een warmteafzet van 100% zijn de operationele opbrengsten voor alle capaciteiten het hoogst bij pyrolyse. Het verschil in opbrengsten uit de verkoop van warmtekrachtcertificaten geven hierbij de doorslag. Bij een warmteafzet van 50% komt men niet in aanmerking voor warmtekrachtcertificaten. De operationele opbrengsten zijn dan nog steeds het hoogst bij pyrolyse.

14.1.4 De netto contante waarde

Zoals vermeld in paragraaf 10.1.6 is de NCW bij vergassing het hoogst wanneer alle geproduceerde warmte wordt afgezet voor een vermogen van 5 tot 40 MW_e. Bij een vermogen van 50 MW_e bereikt men de hoogste netto contante waarde bij de gescheiden productie van elektriciteit. Voor pyrolyse is de NCW voor de volledige capaciteitsrange het hoogst bij een warmteafzet van 100%.

Vermogen (MW _e)	Keuze bij enkel elektriciteitsopwekking	Keuze bij 50% warmteafzet	Keuze bij 100% warmteafzet
5	Pyrolyse	Pyrolyse	Pyrolyse
10	Pyrolyse	Pyrolyse	Pyrolyse
20	Vergassing	Vergassing	Pyrolyse
30	Vergassing	Vergassing	Pyrolyse
40	Vergassing	Vergassing	Vergassing
50	Vergassing	Vergassing	Vergassing

Tabel 177 : keuze tussen vergassing en pyrolyse bij enkel elektriciteitsopwekking en warmteafzet van 50 en 100%

Uit tabel 177 blijkt dat in het algemeen pyrolyse de meest aantrekkelijke conversietechniek is bij lage vermogens. Wanneer het vermogen van de installatie toeneemt lijkt vergassing de voorkeur te verdienen.

Vermogen (MW _e)	Keuze	Warmteafzet
5	Pyrolyse	WKK
10	Pyrolyse	WKK
20	Pyrolyse	WKK
30	Pyrolyse	WKK

40	Vergassing	WKK
50	Vergassing	Elektriciteit

Tabel 178 : keuze die tot hoogste NCW leidt

Tabel 178 geeft voor elk vermogen weer welke conversietechniek tot de hoogst mogelijke netto contante waarde leidt, rekening houdend met het percentage van de warmteafzet. Hieruit blijkt dat bij een vermogen van 5 tot 30 MW_e een pyrolyse-installatie waarvan alle geproduceerde warmte wordt afgezet tot de hoogst mogelijke netto contante waarde leidt. Bij een elektrisch vermogen van 40 MW_e wordt de hoogste NCW bereikt bij een WKK-vergassingsinstallatie op voorwaarde dat alle warmte verkocht kan worden. De hoogste netto contante waarde bij een vermogen van 50 MW_e komt tot stand bij een vergassingsinstallatie waarin er enkel elektriciteit wordt geproduceerd.

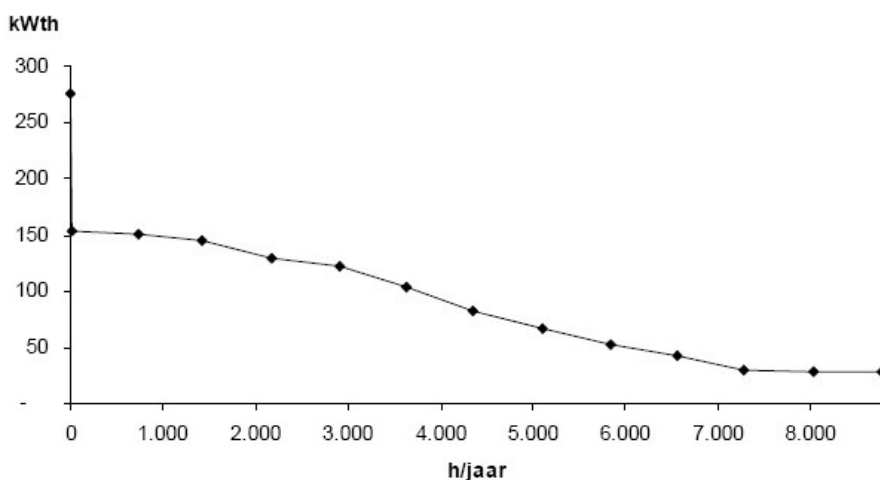
14.2 Conclusies en aanbevelingen voor verder onderzoek

Zoals in paragraaf 6.2.2.2 vermeld werd is er in Vlaanderen momenteel niet voldoende korte omloophout beschikbaar om een elektrisch vermogen van 5 tot 50 MW_e op te wekken. Volgens De Ruyck *et al.* (2006) zal het nog een hele tijd vergen alvorens korte omloophout de markt penetreert. Het grote risico, het gebrek aan ervaring, rechtsonzekerheid en de financiële onaantrekkelijkheid maken het telen van korte omloophout immers onaantrekkelijk voor de landbouwer. (De Ruyck *et al.*, 2006) Deze rechtsonzekerheid is het gevolg van de aanpassing van de pachtwetgeving. Uit een interview met klimaatdeskundige Veerle Campens van de landbouwadministratie, dat op 16 maart 2009 verscheen op de website van VILT, blijkt immers dat het vanuit juridisch oogpunt niet eenvoudig is voor een pachter om meerderjarige gewassen zoals wilg te telen. Energieteelten zullen echter vanaf dit jaar in aanmerking komen om toeslagrechten te activeren. Toch is er volgens Campens een bijkomende premie noodzakelijk om de boeren te overtuigen om korte omloophout te telen. Een eventuele stijging van de olieprijs kan volgens Campens de interesse voor energieteelten snel weer aanwakkeren. (VILT, 2009) De Ruyck *et al.* (2006) zien het gebruik van korte omloophout als een aantrekkelijke route in termen van opbrengst, rendement en vermeden CO₂-uitstoot. Momenteel is korte omloophout echter nog niet genoeg beschikbaar. (De Ruyck *et al.*, 2006) Men zou er in de toekomst dus alles aan moeten doen om ervoor te zorgen dat er voldoende korte omloophout beschikbaar is in Vlaanderen. Op 17 april 2009 vond er in Doornik een demonstratienamiddag rond korte

omloophout plaats. De stad Doornik wenst het stedelijk zwembad te verwarmen en van elektriciteit te voorzien met behulp van een WKK-vergassingsinstallatie die jaarlijks 1 350 ton droge stof korte omloophout kan verwerken. De biomassa die wordt aangewend is afkomstig uit de onmiddellijke omgeving van de installatie. In 2006 werd er in Doornik reeds 25 hectare korte omloophout aangeplant. (Verdonckt, 2009) Ook in Ryckvelde bij Brugge werd er in januari 2009 een demonstratienamiddag rond korte omloophout georganiseerd. Dergelijke projecten tonen aan dat de energieteelt korte omloophout toch stilaan de nodige aandacht begint te krijgen.

In hoofdstuk 10 werd er bij verschillende percentages van warmteafzet de netto contante waarde berekend voor een pyrolyse-installatie waarbij de aangevoerde biomassa met zware metalen vervuild is. Hierbij werd dezelfde aanvoerkost van het korte omloophout verondersteld als bij niet vervuilde biomassa. Mogelijk ligt de prijs van vervuild korte omloophout lager dan die van niet vervuild korte omloophout. Een verder onderzoek naar de aanvoerkost van korte omloophout dat vervuild is met zware metalen stelt ons in staat om de analyse uit hoofdstuk 10 accurater uit te voeren.

Om de vergelijkbaarheid tussen vergassing en pyrolyse mogelijk te maken werd er gekozen om voor beide installaties een zelfde capaciteitsrange van 5 tot 50 MW_e te analyseren. Er bestaan echter ook kleinschalige toepassingen van WKK-installaties. Een warmtekrachtkoppeling kan bijvoorbeeld op kleine schaal worden aangewend om in de warmtebehoefte van een zwembad te voorzien. De behoefte aan warmte volgt echter de buitentemperatuur. Hierdoor draait de kleinschalige warmtekrachtkoppeling niet het hele jaar door. Tijdens periodes met een lage warmtebehoefte is het zelfs mogelijk dat de installatie wordt stilgelegd. De omvang van de WKK-installatie wordt bepaald aan de hand van het verbruikspatroon. Hiervoor maakt men gebruik van een jaarbelastingsduurkromme. (Battjes *et al.*, 1999) Deze kromme geeft weer gedurende hoeveel uur bijvoorbeeld een zwembad nood heeft aan een bepaald vermogen. (Koppejan en Meulman, 2002) In onderstaande figuur vindt men een voorbeeld van een jaarbelastingsduurkromme terug. Indien men een warmtekrachtkoppeling met een vermogen van 100 kW_{th} beschouwt, voldoet men gedurende ongeveer 5 260 uren aan de warmtevraag van het zwembad. Er is zelfs een overschot aan warmte, die eventueel elders kan worden afgezet. Gedurende de overige 3 500 uren voldoet men echter niet aan de warmtevraag en dient het tekort opgevangen worden door een andere energiebron.



Figuur 31: voorbeeld van een jaarbelastingsduurkromme

Bron: Koppejan en Meulman (2002)

In Het Belang van Limburg verscheen er op 13 februari 2009 een artikel over een warmtekrachtkoppeling die bungalowpark Molenheide in Houthalen-Helchteren van warmte en elektriciteit dient te voorzien. In dit bungalowpark met zwembad wordt er jaarlijks 3 miljoen kilowattuur elektriciteit verbruikt. Indien we 7 000 operationele uren per jaar veronderstellen volstaat een warmtekrachtkoppeling met een elektrisch vermogen van minder dan 0,5 MW_e om aan de energiebehoefte van Molenheide te voldoen. Dergelijke voorbeelden tonen aan dat er nog mogelijkheden tot verder onderzoek liggen bij installaties met een elektrisch vermogen dat kleiner is dan 5 MW_e. Eventueel kan men bij een dergelijk vermogen een vergelijking maken tussen gewone pyrolyse en mobiele pyrolyse.

Het basismodel bij de investering in een WKK-installatie gaat uit van een warmteafzet van 100%. Het is echter zeer de vraag of men er gedurende het hele jaar erin slaagt om alle geproduceerde warmte af te zetten. Gedurende de zomermaanden is de vraag naar warmte immers veel kleiner. Verder blijken er ook problemen op te duiken bij de afzet van elektriciteit. Zo vinden we bij Ceunen (2008) terug dat op 12 april 2008 Eandis, de beheerder van laagspanningsnetten in Vlaanderen, toegaf dat het elektriciteitsnet verzadigd is. Hierdoor geraakt niet alle geproduceerde groene stroom op het net. Op 27 maart 2009 diende de Nederlandse Minister Maria van der Hoeven van Economische Zaken een wetsvoorstel in. Hierin werd gesteld dat duurzame elektriciteit vanaf 1 januari 2010 voorrang dient te krijgen op het hoogspanningsnet. Bij een overaanbod van

elektriciteit van niet-duurzame stroom moeten de netbeheerders via congestiemanagement terugschakelen naar duurzame stroom. (Vakblad voor de Bloemisterij, 2009) Congestiemanagement is een systeem dat het voorkomen van overlast op het elektriciteitsnet beoogt. Hierbij dienen de producenten van elektriciteit een dag van tevoren aan te geven hoeveel elektriciteit zij op een bepaald tijdstip zullen produceren. Op basis van de vraag naar elektriciteit op dat specifieke tijdstip kan men nagaan of men maatregelen dient te nemen om congestie te vermijden. Zo kan men bijvoorbeeld producenten van groene stroom betalen om tijdelijk niet te produceren. (Westland Energy Solutions, 2008) Mogelijk dienen in Vlaanderen soortgelijke maatregelen genomen te worden indien het elektriciteitsnet verzadigd blijft.

Tijdens de vergassing van korte omloophout ontstaat er stookgas. Tijdens deze studie werd verondersteld dat het stookgas wordt aangewend voor de productie van energie. In paragraaf 3.3.1 werd reeds vermeld dat stookgas ook een niet-energetische toepassing kent, namelijk grondstofrecyclage door voeding aan de chemische industrie. De producten van de pyrolyse van korte omloophout zijn pyrolyse-olie, cokes en een niet-condenseerbaar gas. Zoals vermeld in paragraaf 4.5 kan pyrolyse-olie ingezet worden voor de productie van energie. Een niet-energetische toepassing van pyrolyse-olie is liquid smoke. Tijdens de economische analyse werden de cokes aangewend om het pyrolyseproces van energie te voorzien. In paragraaf 4.1 werden echter een aantal niet-energetische toepassingen van cokes besproken. Zo kunnen cokes ingezet worden om de regeneratie van CO₂ in de bodem te vergemakkelijken. Ook worden cokes gebruikt als koolstofrijke grondstof voor de bereiding van actieve kool. In een verder onderzoek zou de economische rendabiliteit van het aanwenden van stookgas, pyrolyse-olie en cokes voor de hoger vernoemde niet-energetische toepassingen kunnen worden nagegaan.

Bij een vergassingsinstallatie waarin er enkel elektriciteit wordt opgewekt zijn de opbrengsten uit de verkoop van groenestroomcertificaten groter dan de jaarlijkse operationele kosten. De operationele kosten worden dus gedekt zonder de verkoop van de geproduceerde elektriciteit. Bij pyrolyse worden de operationele kosten niet gedekt door de verkoop van de groenestroomcertificaten. Het verschil tussen deze kosten en opbrengsten is echter klein. Gedurende de eerste zes jaren van de levensduur van een WKK-vergassingsinstallatie zijn de groenestroomcertificaten en de warmtekrachtcertificaten voor alle vermogens groter dan de operationele kosten. Bij pyrolyse is dit gedurende de eerste zeven jaren het geval. Het voorgaande illustreert het

belang van deze certificaten voor de rendabiliteit van de investering in een vergassingsinstallatie of pyrolyse-installatie van korte omloophout. Indien de overheid op korte termijn zou beslissen om de toekenning van beide certificaten stop te zetten, worden beide technieken onrendabel. Dit laatste is echter weinig waarschijnlijk aangezien de overheid tot doel heeft beide technieken te lanceren met behulp van deze steunmaatregelen. Op lange termijn verwachten we dat er, door de toegenomen ervaring en know-how, schaalvoordelen zullen optreden waardoor de investering in de vergassing en de pyrolyse van korte omloophout minder duur zal worden. Hierdoor is het erg waarschijnlijk dat op lange termijn de grootte van de groenestroom- en warmtecertificaten zullen afnemen.

In paragraaf 8.7 werd getracht de investeringskost van enkele praktijkvoorbeelden te benaderen aan de hand van ons theoretisch model. We stelden echter afwijkingen tot 50% vast. De reden hiervoor is dat bepaalde factoren kunnen verschillen van installatie tot installatie. De investeringskosten zijn bijvoorbeeld afhankelijk van de staat van het terrein waarop de installatie wordt gebouwd. Wat betreft de operationele kosten kan de afstand vanwaar het korte omloophout dient aangevoerd te worden de aanvoerkosten sterk beïnvloeden. Ook de loonskosten kunnen verschillen van locatie tot locatie en zo een invloed uitoefenen op de operationele kosten. Steunmaatregelen verschillen van land tot land en kunnen de rendabiliteit van een investeringsproject sterk beïnvloeden. Het is echter moeilijk om dergelijke specifieke omstandigheden op te nemen in een allesomvattend theoretisch model.

De conversietechnieken voor de omzetting van korte omloophout in energie zijn vergassing, pyrolyse en verbranding. De eerste twee technieken werden tijdens deze eindverhandeling onderworpen aan een economische analyse. Voor verbranding werd in 2008 een soortgelijke analyse uitgevoerd door Ceunen. Ondanks dat de economische analyse van deze drie technieken over eenzelfde capaciteitsrange werd uitgevoerd is een zinvolle vergelijking tussen de drie technieken onmogelijk. Er bestaan immers een aantal fundamentele verschillen tussen het model van Ceunen en het model van deze eindverhandeling. Zo nam Ceunen bijvoorbeeld geen energiekosten op in haar model. Verder wordt er in deze eindverhandeling verondersteld dat er in drie shiften gewerkt wordt, terwijl er bij Ceunen sprake is van slechts één shift. Indien het model van Ceunen zou kunnen worden afgestemd op het model van deze eindverhandeling, zou het mogelijk zijn om voor een bepaald vermogen na te gaan welke conversietechniek het

meest rendabel is. Een dergelijke analyse zou in combinatie met een juridisch luik de basis kunnen vormen van een ondernemingsplan. Het juridische aspect kwam tijdens deze eindverhandeling weinig aan bod, in een verder onderzoek zou men bijvoorbeeld dieper in kunnen gaan op de vergunningen die nodig zijn bij de verschillende technieken.

In hoofdstuk 13 werden de externe effecten van de vergassing en pyrolyse van korte omloophout besproken. De vermeden CO₂-uitstoot van energieproductie uit korte omloophout ten opzichte van energieproductie in een kolencentrale werd gemonetariseerd. Verder werd ook berekend hoeveel CO₂ er uitgestoten wordt tijdens het transport van het korte omloophout van het veld naar de pyrolyse- of vergassingscentrale. Volgens de Federale Raad voor Duurzame Ontwikkeling (2008) komt er ook CO₂ vrij tijdens de productie en de omvorming van biomassa. Voor deze eindverhandeling denken we dan aan de CO₂-emissies die zich voordoen bij het aanplanten en het oogsten van het korte omloophout en bij het verkleinen en drogen ervan. Ook tijdens het transport van de assen bij vergassing en van de cokes bij pyrolyse (enkel bij biomassa vervuild met metalen) wordt er CO₂ uitgestoten. Een interessant onderzoek kan gevoerd worden naar de totale CO₂-uitstoot tijdens al deze activiteiten. Ook de monetarisatie van de andere externe effecten die in hoofdstuk 13 werden besproken is een mogelijk onderwerp van verder onderzoek.

Literatuurlijst

- Acker, van, P., Automatisering levert zowel bijdrage aan als middel tegen uitstoot broeikasgassen (2007) (online). Beschikbaar op: http://www.computable.nl/artikel/ict_topics/maatschappij/1992387/2429449/co2-ict-weet-er-weg-mee.html
- Actieplan cadmium, 84p (2006) (online). Beschikbaar op: [http://www.zorg-en-gezondheid.be/uploadedFiles/NLsite/Preventie/Gezondheid en milieu/Zware met alen/actieplan-cadmium-20060221.pdf](http://www.zorg-en-gezondheid.be/uploadedFiles/NLsite/Preventie/Gezondheid%20en%20milieu/Zware%20metalen/actieplan-cadmium-20060221.pdf)
- Agentschap Economie, Ecologiepremie (2008) (online). Beschikbaar op: http://ewbl-publicatie.vlaanderen.be/servlet/ContentServer?pagename=Ondernemen/Page/MVG_CMS4_VT_Special_Subnav&cid=1196737282623&c=Page
- Agentschap Economie, Vlaams Energieagentschap, Limitatieve Technologieën Lijst, 104p (2008) (online). Beschikbaar op: <http://ewbl-publicatie.vlaanderen.be/Uploads/LTL-call-200803-pertype.pdf>
- AgriHolland, De kansen van landbouwgewassen als grondstof voor energie (online). Beschikbaar op: <http://www.agriholland.nl/dossiers/biobrandstoffen/agrarischesector.html>
- Agro, Agro-nieuwsbrief (2008) (online). Beschikbaar op: http://www.westeneng.nl/pdf/agro_augustus_2008.pdf
- Algemene Directe Statistiek en Economische Informatie, Kerncijfers voor het Vlaams Gewest (2006) (online). Beschikbaar op: http://statbel.fgov.be/verkiezingen2006/downloads/com_gem_02000_nl.pdf
- Algemene Directe Statistiek en Economische Informatie, Land -en tuinbouwteiling (2008) (online). Beschikbaar op: http://statbel.fgov.be/figures/d50_nl.asp#2
- Algemene Directe Statistiek en Economische Informatie, Oppervlakte van het grondgebied, België en gewesten (2008) (online). Beschikbaar op: http://statbel.fgov.be/figures/d110_nl.asp#1
- Annema, J.A. en Brink, van den, R.M.M., Kosteneffectiviteit CO₂-beleid personenauto's, Methodische verkenning, 69p (2007) (online). Beschikbaar op: <http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/500076001.pdf>
- Barynin, J., The evolution of energy, Biomass to bio-oil, Thermalnet, issue 4, 43p (2007) (online). Beschikbaar op: http://www.thermalnet.co.uk/docs/ThermalNet_June%2007%20PyNe1.pdf
- Battjes, J.J. *et al.*, Toekomst Warmtekrachtkoppeling, Verkenning van de economische aantrekkelijkheid in een geliberaliseerde energiemarkt, 83p (1999) (online). Beschikbaar op: <http://www.ecn.nl/docs/library/report/1999/c99086.pdf>

- Berg, Van den, W.J. en Wiersma, G. (2004) Biomassaketens energetisch en economisch vergeleken, 74p
- Biewinga, E. E. en Bijl, van der, G. (1996) Sustainability of energy crops in Europe, A methodology developed and applied, Centre for Agriculture & Environment, CLM
- Biogas-E, Verhoogde investeringsaftrek voor energiebesparende investeringen, 9p (online). Beschikbaar op: <http://www.biogas-e.be/Pdf/verhoogdeinvesteringsaftrekbijlage.pdf>
- Biomassa Stroomlijn, Houtapart, Biomassa: snoeihout uitstekend geschikt, 6p (2003) (online). Beschikbaar op: <http://biomassastroomlijn.nl/documents/P-juli2003.pdf>
- Biomass Technology Group, BTG's Fast Pyrolysis Process, Liquid Biofuel from Biomass & Waste, 2p (online). Beschikbaar op: <http://www.btgworld.com/uploads/documents/Brochure%20BTG%20Fast%20Pyrolyse.pdf>
- Biomass Technology Group, Energie uit Biomassa, Achtergrondinformatie over beleid, chemie en techniek, 142p (2005) (online). Beschikbaar op: http://www.senternovem.nl/mmfiles/Energie%20uit%20biomassa%20-%20Achtergrondinformatie%20over%20beleid,%20chemie%20en%20techniek_tcm24-200255.pdf
- Biomass Technology Group, Gasmotor, 4p (2007) (online). Beschikbaar op: http://www.btgworld.nl/uploads/documents/BTG-Factsheet%20Gasmotor_20-02-2007.pdf
- Biomass Technology Group, Micro gasturbine (2007) (online). Beschikbaar op: http://www.btgworld.nl/uploads/documents/BTG-Factsheet%20Gasmotor_20-02-2007.pdf
- Biomass Technology Group, Pyrolyse-olie, 2p (2007) (online). Beschikbaar op: http://www.btgworld.nl/uploads/documents/BTG-Factsheet%20Pyrolyseolie_16-02-2007.pdf
- Biopact, Mobile pyrolysis plant converts poultry litter into bio-oil (2007) (online). Beschikbaar op: <http://news.mongabay.com/bioenergy/2007/08/mobile-pyrolysis-plant-converts-poultry.html>
- Blom, M. *et al.*, Nieuwe elektriciteitscentrale in Nederland, De 'vergeten' kosten in beeld, 122p (2007) (online). Beschikbaar op: <http://www.energiesaad.nl/Include/ElectosFileStreaming.asp?FileId=227>
- Boerrigter, H. *et al.*, Duurzaam synthesesegas, Een brug naar een duurzame energie- en grondstoffenvoorziening, 69p (2004) (online). Beschikbaar op: http://www.senternovem.nl/mmfiles/135538_tcm24-280032.pdf
- Boosten, M, Fytoremediatie, Aanplant met robinia biedt kansen (2005) (online). Beschikbaar op : http://www.robinia.nl/fytoremediatie_2005rb.html

- Brammer, J.G. *et al.*, Techno-economic assessment of power production from the Wellman and BTG fast pyrolysis processes, 20p (online). Beschikbaar op: <http://www.aston-berg.co.uk/docs/J%20Brammar%20-%20Techno-economic%20Assessment.pdf>
- Brem, G. en Bramer, E.A., PyRos: a new flash pyrolysis technology for the production of bio-oil from biomass residues, 14p (2006) (online). Beschikbaar op: [http://www.tno.nl/downloads/Full Paper Biomass Conference Singapore G%20Brem PyRos.pdf](http://www.tno.nl/downloads/Full_Paper_Biomass_Conference_Singapore_G%20Brem_PyRos.pdf)
- Bridgwater, A. V. *et al.* (2002) A techno-economic comparison of power production by biomass fast pyrolysis with gasification and combustion, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 66p
- Bridgwater, A. V. *et al.* (1995) Techno-economic assessment of biomass to energy, 22p
- Brussels Green Tech, Asseau n.v. (2008) (online). Beschikbaar op: http://www.brusselsgreentech.be/nl/details_entreprises.php?menu_ID=3&e_ID=22
- Buchholz, T. en Volk, T., Final Report Biosyrca Project, Designing short-rotation coppice based bioenergy systems for rural communities in East Africa, 35p (2007) (online). Beschikbaar op: http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNADL582.pdf
- Caputo, A. C. *et al.* (2005) Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants: effects on logistic variables, Biomass and Bioenergy, 17p
- Carbolia, Pyrolysis and gasification, Advanced Biomass Research for Beyond the Petroleum Age (online). Beschikbaar op: <http://www.carbolea.ul.ie/pyrolysis.html>
- Ceulemans, R. *et al.*, Biomassa, ODE-Vlaanderen, 36p (2001) (online). Beschikbaar op: http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/doc/brochure_biomassa.pdf
- Ceunen, S., (2008) Economische haalbaarheid van verbranding voor de omzetting van biomassa in energie, eindverhandeling, 181p
- Claes K, *et al.*, Onrendabele toppen van duurzame elektriciteitsopties in Vlaanderen, 52p (2005) (online). Beschikbaar op: http://ode.be/images/stories/Rapporten/heb_vito_anre_onrendabele%20top_eindrapport_nov2005.pdf
- Cleijne, J.W *et al.*, Technisch-economische parameters van duurzame elektriciteitsopties in 2008, Conceptadvies onrendabele topberekeningen, ECN, 49p (2006) (online). Beschikbaar op: <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2006/e06025.pdf>
- Coenen, J. en Schlatmann, S., Biomassa WKK in de glastuinbouw, Evaluatie van transitieroutes, 50p (2005) (online). Beschikbaar op:

[www.tuinbouw.nl/Website/PTcontent.nsf/vwAllOnID/.../\\$File/EindrapportageBioWKKtransitieroutesfinal.doc](http://www.tuinbouw.nl/Website/PTcontent.nsf/vwAllOnID/.../$File/EindrapportageBioWKKtransitieroutesfinal.doc)

- Coenen, J. *et al.*, Handleiding Biomassa WKK, Productschap Tuinbouw, 65p (2008) (online). Beschikbaar op : <http://www.vakbladvoordebloemisterij.nl/.../true/im/false/id/107710/Handleiding%20biomassa%20wkk%200804.pdf>
- Cogeneration Technologies, Bubbling Fluidized Bed (1999) (online). Beschikbaar op: http://www.cogeneration.net/bubbling_fluidized_bed.htm
- Cogen Energy, Biomassa in Vlaanderen, 12p (online). Beschikbaar op: <http://www.cogen-energy.be/BRBIOMASSA.pdf>
- Cogen Projects, Pyrolyse (2004) (online). Beschikbaar op: <http://gtb.cogenprojects.nl/index.php?id=2410>
- Cogen Vlaanderen VZW, Basishandboek Warmtekrachtkoppeling, 173p (2006) (online). Beschikbaar op: http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/doc/wkk_basishandboekcogen.pdf
- Cogen Vlaanderen, Wat is Warmtekrachtkoppeling? (online). Beschikbaar op: <http://www.cogenvlaanderen.be/website/cogen.nsf/webpages/4F58D687378E80A5C125727400153ED6>
- Commissie Ampere, Hernieuwbare en alternatieve energieën, 61p (online). Beschikbaar op: http://mineco.fgov.be/energy/ampere_commission/F.pdf
- Commissie Ampere, Warmtekrachtkoppeling, 45p (online). Beschikbaar op: http://mineco.fgov.be/energy/ampere_commission/d7.pdf
- Commissie Benchmarking Vlaanderen, Warmte kracht koppeling, 7p (2007) (online). Beschikbaar op: <http://www.benchmarking.be/docs/023-0096%20WKK.pdf>
- Daoud, I. en Lebbe, Y., Inleiding tot warmtekrachtkoppeling, Bepaal de relevantie van de installatie van een centrale met warmtekrachtkoppeling, 40p (2005) (online). Beschikbaar op http://www.ibgebim.be/uploadedFiles/Contenu_du_site/Professionnels/Themes/L%C3%A9nergie/La_cog%C3%A9n%C3%A9ration/Les_outils/2_WKK_Brochure_mei%202006.pdf
- Dawson, M., Short rotation coppice willow best practice guidelines, 45p (2007) (online). Beschikbaar op: [http://www.ruralgeneration.com/Boiler%20Brochures/best%20practice%20guide\(1\).pdf](http://www.ruralgeneration.com/Boiler%20Brochures/best%20practice%20guide(1).pdf)
- De Borger, B. en Van Poeck, A. (2004) Algemene economie, 540p

- De Bruin, Energie uit afval en biomassa, 108p (online). Beschikbaar op: www.bvor.nl/Intranet/documentatie/concepttekstEnergie%20uit%20afval%20en%20biomassa.doc
- De Coster, C., De sluipende aanslag van zware metalen, 1p (2005) (online). Beschikbaar op: <http://www.biw.kuleuven.be/persberichten/fiches/TD-051017.pdf>
- De Nocker, L. *et al.*, Internalisering van externe kosten voor de productie en de verdeling van elektriciteit in Vlaanderen, Samenvatting, 15p (2005) (online). Beschikbaar op: http://www.milieurapport.be/Upload/Main/MiraData/MIRA-T/03_GEVOLGEN/03_03/ECON_O&O_07.PDF
- De Paepe, M. en Mertens, D. (2007) Energy Conversion Management
- Departement Leefmilieu, Natuur en Energie, VKC - Overleg Werkgroep Landbouw, 7p (2007) (online) Beschikbaar op: [http://www.lne.be/themas/klimaatverandering/klimaatconferentie/vlaamseklimateconferentie/werkgroepen-1/landbouw/enquete-glastuinbouw-evaluatie-en-rapportering-voortgang-vkp-\(september-2007\)/070920%20verslag%20VKC%20WG%20landbouw.pdf](http://www.lne.be/themas/klimaatverandering/klimaatconferentie/vlaamseklimateconferentie/werkgroepen-1/landbouw/enquete-glastuinbouw-evaluatie-en-rapportering-voortgang-vkp-(september-2007)/070920%20verslag%20VKC%20WG%20landbouw.pdf)
- Department for Environment, Food and Rural Affairs, Growing short rotation coppice, Best practice guidelines for applicants to Defra's energy crops scheme, 30p (2004) (online). Beschikbaar op: http://www.naturalengland.org.uk/Images/short-rotation-coppice_tcm6-4262.pdf
- De Ruyck *et al.*, Liquid biofuels in Belgium in a global bio-energy context, part 1: sustainable consumption and production patterns, 139p (2006) (online). Beschikbaar op: http://www.belspo.be/belspo/home/publ/pub_ostc/CPen/rappCP53r_nl.pdf
- De Standaard, Cadmiumkoeien berokkenen boeren weinig schade (2004) (online). Beschikbaar op: <http://www.standaard.be/Artikel/Detail.aspx?artikelId=g6q7mnsh>
- De Standaard, Maximumprijzen olieproductie (2009) (online). Beschikbaar op: <http://services.eurobench.com/destandaard/oliemax.aspx?groupname=oliemarktmax>
- Devriendt, N. *et al.*, Hernieuwbare warmte uit biomassa in Vlaanderen, VITO, 149p (2004) (online). Beschikbaar op: http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/doc/biomassa_hernieuwbare_warmte.pdf
- Dexters, A., Kleine WKK's, De wereld van het goede voorbeeld (2007) (online). Beschikbaar op: http://www.ideg.info/media/docs/upload/micro%20WKK_s.pdf
- Dooms *et al.*, Potentieelstudie biobrandstoffen in Vlaanderen, VITO en 3 E, 350p (2006) (online). Beschikbaar op: [http://www.lne.be/themas/klimaatverandering/klimaatconferentie/vlaamseklimateconferentie/werkgroepen-1/landbouw/enquete-glastuinbouw-evaluatie-en-rapportering-voortgang-vkp-\(september-](http://www.lne.be/themas/klimaatverandering/klimaatconferentie/vlaamseklimateconferentie/werkgroepen-1/landbouw/enquete-glastuinbouw-evaluatie-en-rapportering-voortgang-vkp-(september-)

[2007\)/070920%20VKC%20potentieelstudie%20biobrandstoffen%20Vlaanderen_d ef.pdf](#)

- Dornburg, V. en Faaij, A. (2001) Efficiency and economy of woodfired biomass energy systems in relation to scale regarding heat and power generation using combustion and gasification technologies, 18p
- Downie, A., Best pyrolysis technology: a solution for the greenhouse challenge, Thermalnet, issue 05, 43p (2007) (online). Beschikbaar op: <http://www.thermalnet.co.uk/Resources/user/docs/ThermalNet%20Sept%2007%20Issue%2005.pdf>
- Dynamotive, Guelph plant (2008) (online). Beschikbaar op: <http://www.dynamotive.com/en/technology/guelph.html>
- ECN-rapport, Klimaatneutrale energiedragers in de gebouwde omgeving (2002) (online). Beschikbaar op: <http://www.ecn.nl/ps/onderzoeksprogramma/transitietechnologieen/klimaatneutrale-energiedragers/energiedragers/synthesegas/>
- Elbersen, H.W. en Meeusen-van Onna, M.G.J, De haalbaarheid van multifunctionele teelt van energiegewassen en bio-energieproductie in Hardenberg, 91p (2001) (online). Beschikbaar op: <http://www.bioenergy-info.com/haalbaarheid%20teelt%20energiegewassen%20Hardenberg.pdf>
- Electrabel – Europees producent van elektriciteit, STEG-centrales, tweemaal elektriciteit, 4p (online). Beschikbaar op: http://www.electrabel.be/assets/content/corporate/mmv_generation_CCGT_nl_A69BE260B8824235B9580A8A0DB5F5EB.pdf
- Eneco, Leveringstarieven ecostrroom en elektriciteit voor particuliere klanten (2008) (online). Beschikbaar op: <http://prive.eneco.nl/contact/brochures/elektriciteitstarief.pdf>
- Energieonderzoek Centrum Nederland, Vergassing (2001) (online). Beschikbaar op: <http://www.vergassing.nl/>
- Engelen, P. *et al.* (2004) Handboek Financieel Beheer, 723p
- Europese richtlijn biomassa, 8p (2001) (online). Beschikbaar op: http://economie.fgov.be/energy/renewable_energy/directive_2001_77_nl.pdf
- Faaij, A. *et al.* (1998) Externalities of biomass based electricity production compared with power generation from coal in the Netherlands, 23p
- Federale Raad voor Duurzame Ontwikkeling, Achtergrondnota biomassa, 27p (2008) (online). Beschikbaar op: <http://www.belspo.be/frdocfdd/DOC/pub/rest/achtergrondnota%20biomassa.pdf>
- FEDERAUTO, De milieubewuste carrossier, subsidies (online). Beschikbaar op: <http://www.eco-carrosserie.be/subsidie.asp#Ecologiepremie>

- Fiala, M. *et al.* (1997) A model for the optimal dimensioning of biomass-fuelled electric power plants, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 67p
- FOD Economie, K.M.O., Middenstand en Energie, Jaarlijkse gemiddelde eindprijzen voor de verschillende energiedragers (1980-2006) (online). Beschikbaar op: http://www.statbel.fgov.be/figures/d64_nl.asp#1bis
- Garcia, C. V. *et al.*, *Energiegewassen in de Vlaamse landbouwsector*, Steunpunt Duurzame Landbouw, Publicatie 1, 94p (2003) (online). Beschikbaar op: <http://www.kuleuven.ac.be/stedula//nl/publicaties/publicatie1.pdf>
- Gellynck, D., *De kernstop in België: een economische analyse*, 96p (2003) (online). Beschikbaar op: <http://lib.ugent.be/execl/fulltxt/thesis/19992435.pdf>
- Geurds, M. *et al.*, *Bio-energie, Omzetten van vaste biomassa in hernieuwbare warmte en elektriciteit*, ODE-Vlaanderen, 76p (2006) (online). Beschikbaar op: http://ode.be/images/stories/Brochures/bim3_vaste_biomassa.pdf
- Geurds, M *et al.* (2005) *Vaste biobrandstof, Onvermoeibare energiebron voor duurzame warmte en elektriciteit*, ODE-Vlaanderen, 2p (online). Beschikbaar op: http://ode.be/images/stories/Brochures/bmb_fo_vaste%20bio-brandstof_061201.pdf
- Govaerts, L. *et al.*, *Potentieelstudie biobrandstoffen in Vlaanderen*, 350p (2006) (online). Beschikbaar op: [http://www.lne.be/themas/klimaatverandering/klimaatconferentie/vlaamseklimateconferentie/werkgroepen-1/landbouw/enquete-glastuinbouw-evaluatie-en-rapportering-voortgang-vkp-\(september-2007\)/070920%20VKC%20potentieelstudie%20biobrandstoffen%20Vlaanderen_def.pdf](http://www.lne.be/themas/klimaatverandering/klimaatconferentie/vlaamseklimateconferentie/werkgroepen-1/landbouw/enquete-glastuinbouw-evaluatie-en-rapportering-voortgang-vkp-(september-2007)/070920%20VKC%20potentieelstudie%20biobrandstoffen%20Vlaanderen_def.pdf)
- Grift, J.M. en Fonteijne, de la, M.R., *Biomassa-vergasser tbv WKK's in de tuinbouw*, Productschap tuinbouw, 35p (2007) (online). Beschikbaar op: [http://www.tuinbouw.nl/website/ptcontent.nsf/vwAllOnID/0F2CB40C03F4D944C12572E30033490F/\\$File/Eindrapport%20Biovergasser.pdf](http://www.tuinbouw.nl/website/ptcontent.nsf/vwAllOnID/0F2CB40C03F4D944C12572E30033490F/$File/Eindrapport%20Biovergasser.pdf)
- Hemmes *et al.*, *Inzet van biomassa/ afvalstromen in het droogproces van GIBO*, ECN, 76p (2005) (online). Beschikbaar op: <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2005/c05080.pdf>
- Het Belang van Limburg, *Boer levert warmte en stroom voor Molenheide* (2009) (online). Beschikbaar op: <http://www.hbvl.be/limburg/houthalen-helchteren/boer-levert-warmte-en-stroom-voor-molenheide.aspx>
- Het Milieueffectenrapport, *Bijlage aan het MER: knowhow ter beschikking van de aanvrager*, 15p (online). Beschikbaar op: <http://www.mumm.ac.be/Common/Windmills/SPE/Bijlage/0%20%20BIJLAGE%20aan%20het%20MER.pdf>
- Hofbauer, H., *Polygeneration based on biomass gasification: experiences from Güssing*, presentatie (online). Beschikbaar op www.euroheat.org/documents/RTD2008/Hermann%20Hofbauer.pdf

- Horizon, Landschap, milieu en natuur op uw bedrijf, "Landbouwer is behoeder van open ruimte", editie Kortrijk, Roeselare, Tielt, 6p (2007) (online). Beschikbaar op: http://www.west-vlaanderen.be/jahia_upload/leefomgeving/natuur/VLM_Horizon_KRT.pdf
- INBO, Van snoeihout tot warmte: een gesloten cyclus (2007). Beschikbaar op: <http://www.inbo.be/docupload/3648.pdf>
- Innovatiesteunpunt voor land- en tuinbouw (INBO), Energie(k) boeren, 6p (2006) (online). Beschikbaar op: [http://www.innovatiesteunpunt.be/hosting/innovatie/site.nsf/0/ea2be81bf5d67bf6c125719b0034b5e4/\\$FILE/Nieuwsbrief_pdf_nr6_juni_2006.pdf](http://www.innovatiesteunpunt.be/hosting/innovatie/site.nsf/0/ea2be81bf5d67bf6c125719b0034b5e4/$FILE/Nieuwsbrief_pdf_nr6_juni_2006.pdf)
- Instituut voor natuur- en bosonderzoek, Technische aspecten korte omloop hout, aanleg, beheer en exploitatie (online). Beschikbaar op: http://www.inbo.be/content/page.asp?pid=DUU_Bos_energiehout_technischeaspecten
- International Energy Agency, Combined Heat and Power, Evaluating the benefits of greater global investment, 39p (2008) (online) Beschikbaar op: http://www.iea.org/Textbase/Papers/2008/CHP_Report.pdf
- International Sugarcane Biomass Utilization Consortium, Design, build-up and evaluation of a sugarcane biomass (bagasse and trash) gasification pilot plant with 3 MW_e of power (2007) (online). Beschikbaar op: <http://www.issct.org/ISBUCresprop1.HTM>
- Islam, M.N. en Ani, F.N. (2000) Techno-economics of rice husk pyrolysis, conversion with catalytic treatment to produce liquid fuel, 9p
- Jacobs, P., Biodiesel, hype of duurzame oplossing? Centrum oppervlaktechemie en katalyse, presentatie (online). Beschikbaar op: http://www.hiw.kuleuven.be/ned/lessen/cursumateriaal/0607/jacobs_pres.pdf
- Junior Chamber International Knokke-Heist, De energiebalans in een gebouw (online). Beschikbaar op: <http://www.jcikh.be/energiebalans>
- Kinable, R. en Zeebroek, P., Ecologiesteun, Cogen Vlaanderen, 7p (2007) (online). Beschikbaar op: [http://www.cogenvlaanderen.be/website/cogen.nsf/Files/20070717%20ecologiepremie.pdf/\\$FILE/20070717%20ecologiepremie.pdf](http://www.cogenvlaanderen.be/website/cogen.nsf/Files/20070717%20ecologiepremie.pdf/$FILE/20070717%20ecologiepremie.pdf)
- Klok, C. *et al.*, Risicobeheer van verontreinigde gronden, Kwetsbaarheid en kansrijkdom van natuurdoelen op verontreinigde bodems, 36p (2004) (online). Beschikbaar op: <http://www2.alterra.wur.nl/Webdocs/PDFFiles/AlterraRapporten/AlterraRapport906.pdf>
- Knoef, H. en Stassen, H., Small scale gasification systems, 17p (online). Beschikbaar op:

http://www.iafbc.ca/funding_available/programs/livestock/documents/LWTI-1_FR_App3.pdf

- Koppejan, J. en de Boer-Meulman, P.D.M., Blokverwarming met hout als brandstof, algemene technische informatie (2002) (online). Beschikbaar op: http://www.bioheat.info/pdf/brochure_nl_techn.pdf
- Koppejan, J. en de Boer-Meulman, P.D.M. (2005) De verwachte beschikbaarheid van Biomassa in 2010, SenterNovem
- Kroon, P. *et al.*, Mogelijke effecten van NO_x-beleid op het warmtekrachtpotentieel, Een analyse van de invloed van bestrijdingskosten op de rentabiliteit van warmtekracht, 50p (2000) (online). Beschikbaar op: <http://gasunie.eldoc.ub.rug.nl/FILES/root/2000/2044104/2044104.pdf>
- Lamont, J. L. *et al.*, Koolzaad, het nieuwe goud?, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Administratie Beheer en Kwaliteit Landbouwproductie (ABKL), 57p (2005) (online). Beschikbaar op: <http://www2.vlaanderen.be/landbouw/downloads/plant/koolzaad.pdf>
- Lamont, J. L. *et al.*, Koolzaad, van zaad tot olie, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, beleidsdomein landbouw en visserij, Brussel, 49p (2005) (online). Beschikbaar op: http://www2.vlaanderen.be/landbouw/downloads/plant/koolzaad_van_zaad_tot_olie.pdf
- Larson, E.D. en Williams, R.H., Biomass Gasifier Gass Turbine Power Generating Technology, 18p (1996) (online). Beschikbaar op: http://www.princeton.edu/~energy/publications/pdf/1996/Williams_96_Biomass_Gasifier_Gas_Turbine.pdf
- Lie, R., Energie uit afval en biomassa, 107p (online). Beschikbaar op: www.bvor.nl/Intranet/documentatie/concepttekstEnergie%20uit%20afval%20en%20biomassa.doc
- Lievens, M., Kernenergie is geen oplossing voor de klimaatwijziging, 3p (2007) (online). Beschikbaar op: http://www.sap-rood.be/cm/index.php?view=article&id=664&format=pdf&Itemid=53&option=com_content
- Loonwijzer, Bruto loon, belastbaar loon, netto loon (2009) (online). Beschikbaar op: <http://www.loonwijzer.be/main/Allesoverjeloan2/brutonetto>
- Martech, Rookgasreiniging, Stikstofoxiden, 36p (online). Beschikbaar op: http://www.martechopleidingen.nl/downloads/rookgasreiniging_voorbeeld.pdf
- Meiresonne, L., Kansen, mogelijkheden en toekomst voor de populierenteelt in Vlaanderen, Korte-omloophout voor energieproductie: plaats in het Vlaamse bosbeleid, 197p (2006) (online). Beschikbaar op: <http://www.inbo.be/files/bibliotheek/30/169630.pdf>

- Meiresonne, L., Klimaatconferentie: sessie landbouw, korte omloophout (2005) (online). Beschikbaar op: <http://www.lne.be/themas/klimaatverandering/klimaatconferentie/vlaamseklimaatconferentie/werkgroepen-1/landbouw/startmoment-landbouw/presentatie%20startmoment%20korte%20omloophout.pdf>
- Mercken, R. (2004) De investeringsbeslissing, een beleidsgerichte analyse, 350p
- Mertens, D., Warmtekrachtcertificaten in Vlaanderen, Cogen Vlaanderen, 11p (online). Beschikbaar op: [http://www.cogenvlaanderen.be/website/cogen.nsf/Files/CertificatenVlaanderen.pdf/\\$FILE/CertificatenVlaanderen.pdf](http://www.cogenvlaanderen.be/website/cogen.nsf/Files/CertificatenVlaanderen.pdf/$FILE/CertificatenVlaanderen.pdf)
- Milieurapport Vlaanderen MIRA, Verspreiding van zware metalen, 117p (2007) (online). Beschikbaar op: http://www.milieurapport.be/Upload/Main/MiraData/MIRA-T/02_THEMAS/02_03/AG_ZWARE_METALEN.PDF
- Ministerie van Economische Zaken, Vademecum van de onderneming, 58p (2009) (online). Beschikbaar op: http://www.economie.fgov.be/enterprises/vademecum/pdf/4_3_1_NL.pdf
- Mueller, B. en Goswami, D., Phytotechnology Technical and Regulatory: Guidance Document, 84 p (2001) (online). Beschikbaar op: <http://www.itrcweb.org/Documents/PHYTO-2.pdf>
- NETL, Gasification, Technologies Research and Development (online). Beschikbaar op: <http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/gasification/rd.html>
- Neyens, J. *et al.*, 'Is er plaats voor hernieuwbare energie in Vlaanderen? Deelrapport: potentieelanalyse', viWTA 2004 – PE03 – 1, 13p (2004) (online). Beschikbaar op: http://www.emis.vito.be/EMIS/Media/energietechnologie_rapport_hernieuwbare_energie_deel1_inleiding.pdf
- Nucleair Forum, België is een atoompionier (2009) (online). Beschikbaar op: <http://www.nuclearforum.be/nl/themas/bevoorrading/belgie-is-een-atoompionier>
- Ochelen, S. en Putzeijs, B. (2008) Milieubeleidskosten. Begrippen en berekeningsmethoden. Departement Leefmilieu, Natuur en Energie, 42p
- ODE-Vlaanderen, Biomassa, 36p (2007) (online). Beschikbaar op: http://www.ode.be/images/stories/Brochures/bma_br_broch%20biomassa%202001_010426.pdf
- Office of Technology Assessment at the German Parliament, Gasification and pyrolysis of biomass (1997) (online). Beschikbaar op: <http://www.tab.fzk.de/en/projekt/zusammenfassung/AB49.htm>
- Officieuze Coördinatie van de Bosreglementering, 35p (2006) (online). Beschikbaar op:

http://www.mina.vlaanderen.be/wiedoetwat/aminal/taken/bosengroen/pdfbestanden/bos/bosdecreet_wet_20_06_2006.pdf

- Ontario, New investments in Ontario (2008) (online). Beschikbaar op: http://www.2ontario.com/edp/locationinvest_results.asp?locationinvest=Guelph
- Ovam Benekempen, Interreg-project BeNekempen (2009) (online). Beschikbaar op: <http://www.ovam.be/jahia/Jahia/pid/1079>
- Portaal Belgische overheid, Vennootschapsbelasting (2008) (online). Beschikbaar op: http://www.belgium.be/nl/economie/onderneming/fiscaliteit_en_boekhouding/vennootschapsbelasting/
- Putsche, V. *et al.* (2006) Large-scale pyrolysis oil production: a technology assessment and economic analysis, 50p
- Raskin, I. en Ensley, B.D. (2000) Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean up the environment
- Richtlijn 2001/80/EG van het Europees Parlement en de Raad van 23 oktober 2001 inzake de beperking van de emissies van bepaalde verontreinigende stoffen in de lucht door grote stookinstallaties, 21p (online). Beschikbaar op: http://www.emis.vito.be/EMIS/Media/Legislation_Docs/pbl271101-1.pdf
- Selinger, A., Pyrolyse, BBT-kenniscentrum VITO, 15p (2001) (online). Beschikbaar op: <http://www.emis.vito.be/AFSS/fiches/Technieken/Pyrolyse.pdf>
- Senternovem, Kompas, energiebewust wonen en werken, Cijfers en tabellen (2006) (online). Beschikbaar op: <http://www.wegwijzerduurzaam bouwen.be/pdf/155.pdf>
- Sibelga, Tarieven netgebruik (2009) (online). Beschikbaar op: http://www.sibelga.be/attachments_NI/E-NL-2009-Tarieven-Netgebruik.pdf
- Siemons, R.V., Pyrolyse in Groningen, Onderzoek naar de haalbaarheid van een transitiecoalitie, Bio Olie Nederland b.v., 45p (2005) (online). Beschikbaar op: <http://www.cleanfuels.nl/Projects%20&%20publications/Eindrapport%20Pyrolyse%20in%20Groningen%20p.pdf>
- Simader, G.R., Case Study: 2 MW_e biomass gasification plant in Güssing (Austria), 6p (2004) (online). Beschikbaar op: <http://www.opet-chp.net/download/wp3/q%C3%BCssingaustria.pdf>
- Staessen, Blootstellingsonderzoek Noorderkempen (2008) (online). Beschikbaar op: <http://www.mmk.be/index.cfm?Id=160&Rubr=4&subsubId=160#wiewat>
- Stahl, K., Biomass IGCC at Värnamo, Sweden–Past and future, 16p (2007) (online). Beschikbaar op: http://gcep.stanford.edu/pdfs/energy_workshops_04_04/biomass_stahl.pdf

- Steunmaatregelen hernieuwbare energie en R.E.G., 11p (2007) (online). Beschikbaar op: <http://www.voka.be/milieu/infotheek/energieadvies/Documents/Dossier%20Steunmaatregelen%20energie.pdf>
- Stijn, van, M., Bio Oil Exploitation NV, 4p (online). Beschikbaar op: http://petermaasen.7host.com/bio-oil/media/en/bio_oil_brochure.pdf
- Stijn, van, M. (2008) Flash Pyrolysis, Facts and Principles
- Swaaij, Van, W., Scenario Biomassa (online). Beschikbaar op: [http://www.impact.utwente.nl/Activities/Opening%20Meander%20\(Dutch\)/20071123%20Meander%20vSwaaij%20final.pdf](http://www.impact.utwente.nl/Activities/Opening%20Meander%20(Dutch)/20071123%20Meander%20vSwaaij%20final.pdf)
- Sweco, Sweco to plan biomass gasification plant in Värnamo (2007) (online). Beschikbaar op: <http://investors.swecogroup.com/files/press/sweco/200704102286en2.pdf>
- Ten Bolscher, G.H., Biomassa: afval of energiebron? (2007) (online). Beschikbaar op: <http://www.dwa.nl/uploads/File/artikelen/2007/EM0307b.pdf>
- Thewys, T. en Kuppens, T. (2008) Economics of willow pyrolysis after phytoextraction, 23p
- Thewys, T. en Kuppens, T. (2007) Hernieuwbare energie uit biomassa afkomstig van fyto-remediatie, Gevalstudie 2: pyrolyse van korte omloophout
- Thuwis, G. (2009) Het Belang van Limburg, Stroom uit mest en maïs voor 5 000 gezinnen
- Tilburg, van, X., Inzet van biomassa in zelfstandige kleinschalige installaties voor de opwekking van elektriciteit (2005) (online). Beschikbaar op: <http://www.mvo.nl/biobrandstoffEN/download/C05016.pdf>
- Twence, Biomassa, bron van duurzame energie (online). Beschikbaar op: <http://www.twence.nl/actueel/dossiers/Bio-energie/Dossier%20biomassa.doc>
- Vakblad voor de Bloemisterij, Duurzame stroom krijgt voorrang op net (2009) (online). Beschikbaar op: <http://www.vakbladvoordebloemisterij.nl/nieuws/2938/duurzame-stroom-krijgt-voorrang-op-net>
- Vandaele, E., Bevolking in België, GJF jaargids (2007) (online). Beschikbaar op: www.moaweb.nl/bibliotheek/nog-opruimen-1/Bevolking%20in%20BE.pdf/at_download/file
- Van der Voort *et al.*, Economie van energiegewassen, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V., 76p (2008) (online). Beschikbaar op: <http://library.wur.nl/way/bestanden/clc/1875766.pdf>
- Växjö Värnamo Biomass Gasification Centre, Värnamo Pilot Plant (online). Beschikbaar op:

http://www.vvbgc.se/index.php?option=com_content&task=view&id=14&Itemid=31&lang=en

- Vereniging voor bos in Vlaanderen, BeleidsFlash nr. 4 (2006) (online). Beschikbaar op: <http://www.vbv.be/Flash/BeleidsFlash4.html>
- Verlaek, M., Wat is stikstofoxide (NO_x)? (online). Beschikbaar op: http://www.mmk.be/afbeeldingen/File/NOx_richtlijn.pdf
- Verykios, X. E., Bio-Electricity: Efficient and clean production of electricity from biomass via pyrolysis oil and hydrogen utilizing fuel cells (2004) (online). Beschikbaar op: http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/04_bioelectricity_en.pdf
- Vis, Ir. M., Beschikbaarheid van reststromen uit de voedings- en genotmiddelenindustrie voor energieproductie, Eindverslag, 92p (2002) (online). Beschikbaar op: <http://gasunie.eldoc.ub.rug.nl/FILES/root/2002/2969041/2969041.pdf>
- VITO, 38p (online). Beschikbaar op: http://www.emis.vito.be/EMIS/Media/energietechnologie_anre_studie_houtafval_hfdst2.pdf
- VITO, 9p (2001) (online). Beschikbaar op: <http://www.emis.vito.be/AFSS/fiches/afvalinfobladen/hout.pdf>
- VITO, CFB - vergassing, bijstook in STEG (Integrated Gasification Combined Cycle - IGCC), 7p (online). Beschikbaar op: http://www.emis.vito.be/AFSS/fiches/uitvoeringen/IntegratedGasificationCombinedCycle_HA.pdf
- VITO, Vergassing, 7p (online). Beschikbaar op: http://www.emis.vito.be/AFSS/fiches/Technieken/Vergassing_en_verbranding.pdf
- Vlaams Agentschap Zorg en Gezondheid, Blootstellingsonderzoek Noorderkempen (2008) (online). Beschikbaar op: <http://www.zorg-en-gezondheid.be/subMenuTabulation.aspx?id=6342>
- Vlaams Agentschap Zorg en Gezondheid, Resultaten Blootstellingsonderzoek Noorderkempen, 2p (2008) (online). Beschikbaar op: http://www.zorg-en-gezondheid.be/uploadedFiles/NLsite/Preventie/Gezondheid_en_milieu/Zware_met_alen/folder_def_LRES.pdf
- Vlaams Energieagentschap, Energiesparen, Bio-energie uit biomassa (online). Beschikbaar op: http://www.energiesparen.be/oud/duurzame_energie/biomassa/bioenergie.php#vergassen
- Vlaams Energieagentschap, Verhoogde investeringsaftrek voor energiebesparende investeringen, 13p (2007) (online). Beschikbaar op: <http://www.bassprojects.be/led/data/verhoogdeinvesteringsaftrekbijslage.doc>

- Vlaams Informatiecentrum over Land- en Tuinbouw (VILT), Interview Veerle Campens, Hoe ver kunnen boeren broeikasgas reduceren? (2009) (online). Beschikbaar op: [http://www.vilt.be/Veerle_Campens - Landbouw en Visserij - Hoe ver kunnen boeren broeikasgas reduceren](http://www.vilt.be/Veerle_Campens_-_Landbouw_en_Visserij_-_Hoe_ver_kunnen_boeren_broeikasgas_reduceren)
- Vlaams Informatiecentrum over Land- en Tuinbouw (VILT), Van wilg tot Watt (online). Beschikbaar op: <http://www.vilt.be/vilt-info/detail.phtml?id=381>
- Vlaams Klimaatbeleidsplan 2006-2012, 124p (2006) (online). Beschikbaar op: http://www.lne.be/themas/klimaatverandering/toncontract/vkp_2006-2012_def.pdf
- Vlaams Parlement, Voorstel van resolutie betreffende de invoering van duurzaamheidscriteria voor biobrandstoffen en groene stroom, 9p (2007) (online) Beschikbaar op: <http://jsp.vlaamsparlement.be/docs/stukken/2006-2007/g1132-1.pdf>
- Vlaamse Codex, Ministerieel besluit van 6 oktober 2006 inzake de vastlegging van referentierendementen voor toepassing van de voorwaarde voor kwalitatieve warmtekrachtinstallaties (2009) (online). Beschikbaar op: <http://212.123.19.141/ALLESNL/wet/detailframe.vwp?SID=0&WetID=1015220>
- Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt, Energiemarkt, Wie doet wat? Het systeem van groenestroomcertificaten (GSC) (2007) (online). Beschikbaar op: http://www.vreg.be/nl/03_algemeen/02_energiemarkt/02_wiedoetwat/07_groene_stroom.asp
- Vlaamse Reguleringsinstantie voor de Elektriciteits- en Gasmarkt, WKK-producenten, Het systeem van warmtekrachtcertificaten, Certificatenverplichting (2007) (online). Beschikbaar op: http://www.vreg.be/nl/06_sector/05_wkkproducenten/01_systeem/06_certificate_nverplichting.asp
- VLAREM I, Besluit van de Vlaamse Regering van 6 februari 1991 houdende vaststelling van het Vlaams reglement betreffende de milieuvergunning, 224p (2008) (online). Beschikbaar op: http://www.mina.be/uploads/vlarem_i_versie_2008_08_25.pdf
- VLAREM II, Besluit van de Vlaamse Regering van 1 juni 1995 houdende algemene en sectorale bepalingen inzake milieuhygiëne, 375p (2008) (online). Beschikbaar op: http://www.mina.be/uploads/vlarem_ii_versie_2008_08_25.pdf
- VREG, Aantal verhandelde groenestroomcertificaten en gemiddelde prijs, 12p (online). Beschikbaar op: <http://www.vreg.be/vreg/documenten/Statistieken/54946.pdf>
- VREG, Aantal verhandelde warmtekrachtcertificaten en gemiddelde prijs, 4p (online). Beschikbaar op: <http://www.vreg.be/vreg/documenten/statistieken/54945.pdf>

- VREG, Leveranciers, Openbare dienstverplichtingen, Quotumverplichting warmtekrachtcertificaten (2007) (online). Beschikbaar op: http://www.vreg.be/nl/06_sector/02_leveranciers/02_openbaredienstverplichtingen/04_warmtekrachtcertificaten.asp
- VREG, Meteropneming - Gemiddeld verbruik (2008) (online). Beschikbaar op: http://www.vreg.be/nl/04_prive/05_meteropneming/04_verbruik.asp
- VREG, WKK-producenten, de aanvraag, berekening van het aantal toe te kennen WKC (online). Beschikbaar op: http://www.vreg.be/nl/06_sector/05_wkkproducenten/02_aanvraag/03_berekening.asp
- Vries, De, B. *et al.*, Energie à la carte, De potentie van biomassa uit het landschap voor energiewinning, 89p (2008) (online). Beschikbaar op: <http://www2.alterra.wur.nl/Webdocs/PDFFiles/Alterrapporten/AlterraRapport1679.pdf>
- VZW Kilowattuur, Wat is uw CO₂-profiel, Berekeningstabel met vergelijking van de verschillende brandstoffen wat betreft relatieve energie-inhoud, CO₂-uitstoot en prijs (volgens referentiewaarden) (2005) (online). Beschikbaar op: http://www.co2minderen.be/UW_CO2-PROFIEL/uw_co2-profiel.htm
- Wagenaar, B.M., Snelle pyrolyse van organische nevenstromen en afvalstromen (online). Beschikbaar op: <http://www.valorbin.be/publicaties/Presentatie%20Bio%20Oil%20Exploitation.pdf>
- Waterbley, A. (2005) Kostenbeleid, tweede herziene uitgave, 401p
- Welink *et al.*, Groen gas, Gas van aardgaskwaliteit uit biomassa. Update van de studie uit 2004, 34p (2007) (online). Beschikbaar op: http://www.senternovem.nl/mmfiles/Groen%20Gas%20rapport_tcm24-217612.pdf
- Westland Energy Solutions, Congestie management (2008) (online). Beschikbaar op: <http://www.congestie management.nl/index.html>
- Wynants, K., Cadmiumvervuiling Kempen, nieuwe ontwikkelingen, 6p (online). Beschikbaar op: <http://www.mmk.be/afbeeldingen/File/cadmiumBalenMol.pdf>
- Zeebroek, P. (2009) Steunmaatregelen voor WKK in Vlaanderen, Vlaams Energieagentschap (VEA), Studiemiddag COGEN Vlaanderen, presentatie